Kleine Enzyklopädie

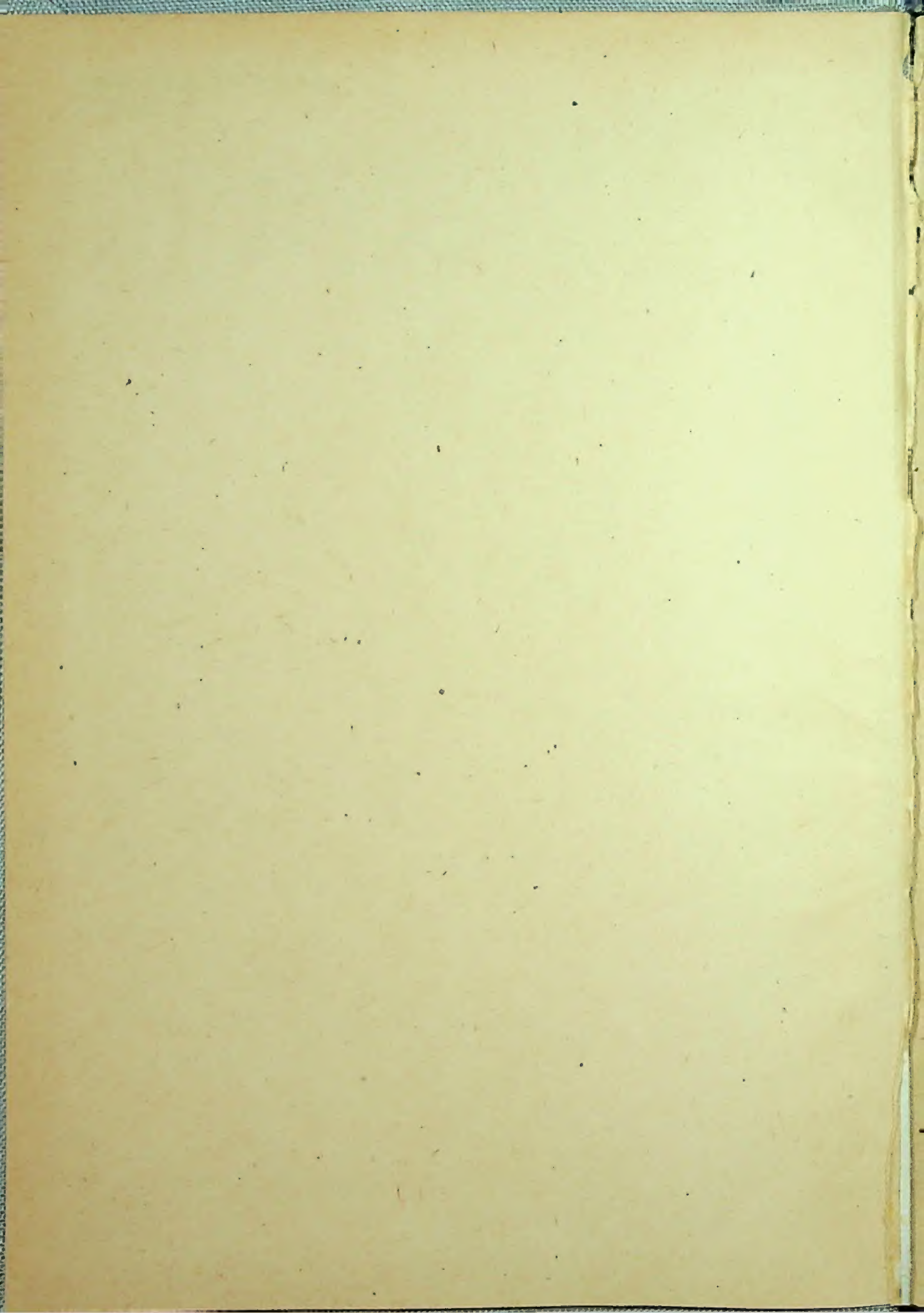
Technik







Kleine Enzyklopädie Technik



Kleine Enzyklopädie

Technik

1000 Strichzeichnungen

80 einfarbige und 16 mehrfarbige Bildtafeln

1981

VEB Bibliographisches Institut

Leipzig

Herausgeber
Prof. Dr. rer. nat. Joachim Jentzsch
Dr.-Ing. Hans-Dieter Junge
Obering. Günther Kohblanck
Prof. Dr. sc. techn. Heinrich Schubert

Gutachter
Prof. Dr. rer. nat. habil. Christian Weißmantel

© VEB Bibliographisches Institut, 1980, 1981
2. Auflage 1981
Verlagslizenz Nr. 433-130/189/81 – LSV 3007
Printed in the German Democratic Republic
Redaktion Naturwissenschaftlich-Technische Nachschlagewerke
Leitender Redakteur: Helmut Kahnt
Bildredaktion: Monika Thiel, Birgit Schnabel
Technische Redaktion und Herstellung: Karin Kabisch
Schutzumschlag- und Einbandgestaltung: Rolf Kunze, Leipzig
Gesamtherstellung: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden
Allg. Redaktionsschluß: Juni 1979
Best.-Nr.: 5769606
DDR 18,– M

Vorwort

Der Band Technik in der Reihe Kleine Enzyklopädien ist ein populärwissenschaftliches Werk, das einen Überblick über die wichtigsten Teilgebiete der Technik vermittelt. Es wendet sich insbesondere an die Werktätigen, denen es sowohl beim Erlernen ihres Berufs als auch später beim Einsatz in der Produktion und bei der Weiterqualifizierung helfen will, sich vielseitige wissenschaftlich-technische Kenntnisse anzueignen. Ebenso sollte es der bereits erfahrene Fachmann öfter zur Hand nehmen, um sich über Nachbargebiete zu orientieren. Schließlich möchte das Buch aber auch jugendliche, noch nicht in der Volkswirtschaft tätige Leser gewinnen, die sich mit den Grundprinzipien der modernen Industrieproduktion und des Verkehrswesens vertraut machen wollen.
Wir glauben, dessen sicher sein zu können, daß die Kleine Enzyklopädie/Technik hierzu einen wertvollen Beitrag leistet. Die Auswahl des Stoffes aus dem großen Gesamtbereich der Technik und die Beschränkung der einzelnen Themen in Hinblick auf den festgesetzten Umfang des Buches waren nicht leicht. Wir haben uns aber bemüht, sowohl die „klassischen" Bereiche der Technik einschließlich der dafür entwickelten neuen Verfahren, Maschinen und Geräte abgerundet zu behandeln als auch die neueren Gebiete, wie Automatisierungs- und BMSR-Technik, Kernenergieerzeugung, Elektronik, Raumfahrt u. a., gebührend zu berücksichtigen und den letzten Stand ihrer Entwicklung darzustellen. In allen Hauptkapiteln legten wir vor allem auf Erwähnung moderner, häufig nachgeschlagener Begriffe Wert.
Das Buch wurde entwickelt in dem Bestreben, eine leichtverständliche Darstellung mit wissenschaftlicher Exaktheit zu verknüpfen. Diesem Ziel dienen auch die zahlreichen Zwischenüberschriften und Spitzmarken, die Kursivschrift von Schlagwörtern, die zahlreichen Übersichten und die Numerierung der Textbilder und Bildtafeln sowie die umfangreiche Verweisung im Text auf Bilder, Bildtafeln, Tabellen u. a. Textstellen. Der Stoff ist durch eine Fülle von Strichzeichnungen und durch viele Bildtafeln veranschaulicht. Hier wurde — ebenso wie im Text — versucht, auch die modernen Verfahren, Maschinen und Geräte abzubilden, die dem Leser noch weniger bekannt sind. Die zur Verfügung stehenden Farbtafeln wurden insbesondere zur farbigen Darstellung von Fließ- und Verarbeitungsschemata, Schnitten u. a. ausgenutzt. Ein ausführliches alphabetisches Register ermöglicht es, auf Tausende von Fragen rasch eine zuverlässige Antwort zu finden.

Allen unseren Mitarbeitern, Autoren, Beratern und Gutachtern, danken wir für ihre Arbeit, ebenso den wissenschaftlichen Instituten, Verlagen, Dienststellen und Betrieben, die uns aus ihren Bildarchiven bereitwilligst Illustrationsmaterial zur Verfügung stellten. Es war für uns eine besondere Freude, daß wir aus dem großen Kreis der bisher gewonnenen 1 Million Leser und Benutzer unseres Buches zahlreiche kritische Stellungnahmen und Verbesserungsvorschläge sowie Anregungen zur weiteren Entwicklung des Werkes erhielten. Für diese tätige Mithilfe sei auch an dieser Stelle nochmals gedankt, und wir bitten alle Leser erneut, uns für die Gestaltung späterer Auflagen geeignete Vorschläge, Hinweise auf Mängel und Lücken sowie Anregungen für weitere Verbesserungen zukommen zu lassen.

Leipzig, Sommer 1980

Herausgeber und Verlag

Inhaltsverzeichnis

1. **Bergbau** 11

1.1. Suche und Erkundung von mineralischen Rohstoffen 11
1.2. Bergbau-Tagebau 20
1.3. Bergbau-Tiefbau 30
1.4. Gewinnung von Erdöl und Erdgas 40
1.5. Mariner Bergbau 47
1.6. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe 50

2. **Energietechnik** 61

2.1. Elektroenergie und ihre Quellen 61
2.2. Fossile Brennstoffe 75
2.3. Gaserzeugung aus Kohle und Kohlenwasserstoffen 76
2.4. Rohrfernleitungen und Gasspeicherung 82
2.5. Erzeugung von Kraftstoffen 84
2.6. Kraft und Energiemaschinen 87
2.7. Kältetechnik 100

3. **Metallurgie** 104

3.1. Metallische Werkstoffe 104
3.2. Eisenmetallurgie 111
3.3. Gewinnung von Nichteisenmetallen 124
3.4. Pulvermetallurgie 138
3.5. Gießprozeß 143
3.6. Halbzeugherstellung durch Umformung 147

4. **Chemietechnik** 159

4.1. Chemische Reaktionen 159
4.2. Schwefel und wichtige anorganische Schwefelverbindungen 160
4.3. Stickstoffverbindungen 163
4.4. Kochsalz und Soda 165
4.5. Chlor und anorganische Chlorverbindungen 167
4.6. Phosphor und Phosphorverbindungen 169
4.7. Synthetische Düngemittel 169
4.8. Karbide 170
4.9. Petrolchemie 171
4.10. Kunststoffe 172
4.11. Technische Fette–Öle–Wachse 179
4.12. Pigmente – Farbstoffe – Anstrichstoffe – Klebstoffe 182
4.13. Explosivstoffe 184

5. **Technik der Hochpolymere** 187

5.1. Plastwerkstoffe 187
5.2. Elastwerkstoffe 202

6. **Silikattechnik** 214

6.1. Bindemittel 214
6.2. Keramik 221
6.3. Glas 229
6.4. Email 238

7. **Holz-, Zellstoff- und Papiertechnik** 240

7.1. Holz als Rohstoff 240
7.2. Grundprozesse der Holzwerkstofftechnik 242
7.3. Werkstoffe und Erzeugnisse aus Holz 245
7.4. Technologie der Papierfaserstofferzeugung 250
7.5. Technologie der Papierstoffaufbereitung 255
7.6. Technologie der Papier-, Karton- und Pappenherstellung 256

7.7. Technologie der Papierausrüstung 258
7.8. Veredeln von Papier 259

8. **Fertigungstechnik** 260

8.1. Urformen 261
8.2. Umformen 261
8.3. Trennen 269
8.4. Fügen 284
8.5. Fertigungshilfsstoffe 290
8.6. Vorrichtungen und Spannzeuge 291
8.7. Stoffeigenschaftsändern 293
8.8. Beschichten und Oberflächenumwandlung 296
8.9. Automatisierung der Fertigungstechnik 302

9. **Maschinenelemente — Hydraulik — Pneumatik** 305

9.1. Maschinenelemente 305
9.2. Hydrostatische und pneumatische Steuerungen und Antriebe 313

10. **Fördertechnik** 320

10.1. Spezielle Maschinenelemente 321
10.2. Spezielle Baugruppen 322
10.3. Stetigförderer 325
10.4. Tagebaugeräte 331
10.5. Lastaufnahmemittel 334
10.6. Hebezeuge 336
10.7. Aufzüge und Schachtförderanlagen 341
10.8. Flurförderzeuge 344
10.9. Lademaschinen 346
10.10. Kipper 347

11. **Elektrotechnik** 348

11.1. Grundlagen der Elektrotechnik 348
11.2. Elektrische Maschinen und Geräte 356
11.3. Übertragung, Umformung und Anwendung elektrischer Energie 362
11.4. Informationstechnik 369
11.5. Elektronische Bauelemente 392

12. **Feinmechanik — Optik — Medizintechnik** 407

12.1. Uhren 407
12.2. Bürotechnik 411
12.3. Optische und feinmechanisch-optische Geräte 416
12.4. Geräte der Medizintechnik 431

13. **Meßtechnik** 442

13.1. Allgemeines über Meßtechnik und Meßgeräte 442
13.2. Messen einzelner Größen 450
13.3. Werkstoffprüfung 464

14. **Automatisierungstechnik** 472

14.1. Zentrale Bedeutung der Automatisierungstechnik 472
14.2. Steuerungs- und Regelungstechnik 473
14.3. Rechentechnik und Datenverarbeitung 483

15. **Bautechnik** 501

15.1. Allgemeines zum Bauwesen 501
15.2. Baustoffe 503
15.3. Grund- und Erdbau 508
15.4. Holzbau 515
15.5. Steinbau 519
15.6. Beton- und Stahlbetonbau 521
15.7. Stahlbau 530
15.8. Ausbau 535
15.9. Technische Gebäudeausrüstung 542
15.10. Wasserwirtschaft — Wasserbau 550
15.11. Straßenbau 564

16. **Technik der Verkehrsmittel** 572

16.1. Bahntechnik — Bahnbetrieb 572
16.2. Kraftfahrzeugtechnik — Kraftverkehr 592
16.3. Schiffstechnik — Schiffahrt 602
16.4. Luftfahrttechnik — Luftverkehr 617
16.5. Raketen- und Raumfahrttechnik 630

17. **Polygrafische Technik** 642

17.1. Druckformenherstellung 642
17.2. Druck 650
17.3. Vervielfältigungstechnik 654
17.4. Buchbindereitechnik 656

18. Verpackungstechnik 660

18.1. Verpackungsfunktionen 660
18.2. Verpackungsprozeß 660
18.3. Gutgruppen 661
18.4. Verpackungswerkstoffe und Verpackungsmittel 661
18.5. Verpackungsmaschinen 665

19. Textil- und Bekleidungstechnik 670

19.1. Textile Faserstoffe 670
19.2. Herstellung von Fäden 674
19.3. Herstellung textiler Stoffe 680
19.4. Textilveredlung 690
19.5. Bekleidungsfertigung 693
19.6. Textilprüfung 699

20. Ledertechnik 702

20.1. Leder und Rauchwaren 702
20.2. Synthetiks 707
20.3. Lederfaser- und Zellulosefaserwerkstoffe 712
20.4. Schuhe 712
20.5. Lederwaren 716
20.6. Leder- und Rauchwarenpflege 717

21. Anhang 718

21.1. Physikalisch-technische Maßeinheiten 718
21.2. Standardisierung 721

Register 723

Tafelteil 753

Autoren

Ackermann, Gerhard, Prof. Dr. sc. techn. 2.1.3.
Arndt, Alfred, Dipl.-Ing. 16.1.5.
Arnold, Werner, Prof. Dr.-Ing. 1.1., 1.4.
Backmann, Roland, Doz. Dr.-Ing. 19.
Blechschmidt, Jürgen, Prof. Dr. sc. techn. 7.4.—7.6.
Böhmer, Johannes, Dr.-Ing. 16.1.7., 16.1.10., 16.1.11.
Broy, Werner, Doz. Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. 5.1.
Brückner, Eberhard, Dr.-Ing. 16.1.1.—16.1.4., 16.1.6.
Brunner, Winfried, Dr. rer. nat. 12.1.3., 12.3.1., 12.3.2., 12.3.4.
Burghardt, Helmut, Doz. Dr.-Ing. 3.2., 3.5.
Busch, Karl-Franz, Prof. Dr.-Ing. 15.10.
Domnitz, Peter, Dipl.-Ing. 13.2.6.—13.2.11.
Eichler, Wolfgang, Dr.-Ing. 12.3.3.
Engelke, Gerhard, Prof. Dr.-Ing. 15.10.
Erben, Gerhard, Dipl.-Ing. 2.3.
Feller, Michael, Dr.-Ing. 15.11.
Fischer, Roland, Prof. Dr. sc. 7.1.—7.3.
Frielinghaus, Karl-Otto, Prof. Dr.-Ing. 12.3.3.
Gebauer, Wolfgang, Dipl.-Ing. 8., 8.1., 8.2., 16.5.
Gebhardt, Siegfried, Dr.-Ing. 11.4.2., 11.4.3.
Georgi, Walter, Prof. Dr.-Ing. 15.7.
Göll, Gerd, Dr.-Ing. 1.6.
Gollnisch, Klaus, Dipl.-Ing. 2.2., 2.5., 2.7.
Gottschalk, Heinz, Dipl.-Ing. 14.2.5.—14.2.7., 14.3.7., 14.3.8.
Günther, Klaus, Dr.-Ing. 3.1.
Gursky, Siegfried, Dr. sc. techn. 12.4.
Haberacker, Herbert, Dr.-Ing. 8.3., 8.6., 8.9.
Hahn, Gerhard, Ing. 12.4.
Heinicke, Gottfried, Prof. Dr. 15.8.
Hermanies, Erich, Doz. Dr.-Ing. 17.
Hoeppner, Klaus, Dipl.-Ing. 13.1., 13.2., 13.2.1.
Höhne, Diethard, Dr.-Ing. 6.3., 6.4.
Hütter, Alfred, Prof. Dr.-Ing. 15.2.
Jung, Lothar, Dr. 11.4.4., 11.4.5., 11.4.8.
Junge, Hans-Dieter, Dr.-Ing. 11.5.5., 21.1.
Kinze, Walter, Prof. Dr.-Ing. 15.3., 15.4.
Koch, Rudi, 12.1.1., 12.1.2.
Kohblanck, Ingo, Ing. 8.4.
Kohblanck, Günther, Obering. 8.5., 8.8.
König, Hartmut, Doz. Dr. rer. nat. 4.
Kreß, Dieter, Prof. Dr. sc. techn. 11.4.1.
Kunze, Werner, Dr.-Ing. 11.1.—11.3.
Leipner, Klaus, Dr.-Ing. 3.3.
Leistner, Erich, Dipl.-Ing. 14.1., 14.2.—14.2.4.
Lepenies, Siegfried, Dr.-Ing. 2.6.
Lietzmann, Klaus-Dieter, Dr.-Ing. 3.4.
Lohwasser, Frank, Dr.-Ing. 15.9.
Mainka, Joachim, Obering. 8.7.
Mansfeld, Werner, Prof. Dr.-Ing. habil. 11.4.6., 11.4.7., 11.5.
Meißner, Franz, Prof. Dr.-Ing. 16., 16.2.
Mende, Alexander, Dr. rer. nat. 11.4.9.
Müller, Lothar, Dr. rer. nat. 20.
Nitsch, Rudolf, Prof. Dr.-Ing. 2.1.—2.1.2., 2.1.4.—2.1.12.
Nitzsche, Karl, Prof. Dr.-Ing. 13.3.
Pforr, Herbert, Dr.-Ing. 1.3.
Piatkowiak, Norbert, Dr.-Ing. 1.2., 1.5.
Plötner, Werner, Dr. Obering. 2.6.6.
Pusch, Hans-Joachim, Dr. rer. pol. 16.3.3., 16.3.4.
Rausendorff, Dieter, Dr.-Ing., Obering. 17.
Schesky, Egon, Dr.-Ing. 16.4.
Schindler, Alfred, LHD, 4.
Schlegel, Ernst, Dr.-Ing. 6.1., 6.2.
Schmidt, Kurt, Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. 5.2.
Schmidt, Rudolf, Dipl.-Ing. 13.2.2.—13.2.5.
Schönknecht, Rolf, Prof. Dr. sc. oec. 16.3.1., 16.3.2.
Schulz, Wolfgang, Doz. Dr.-Ing. 10.
Schwab, Günter, Dr.-Ing. 18.
Seidel, Reinhart, Dipl.-Ing. 16.1.8., 16.1.9.
Smers, Hanspeter, Dipl. rer. oec. 12.2.1.—12.2.3.
Sörgel, Gerhard, Dr.-Ing. 2.6.2., 2.6.3.
Spittel, Tilo, Dr.-Ing. 3.6.
Steiger, Eduard, Prof. em. Dipl.-Ing. h. c. 15.1., 15.5.
Ullrich, Horst, Dipl.-Ing. 18.
Wagner, Klaus, Dr.-Ing. 15.6.
Walter, Karl-Heinz, Dipl.-Ing. 2.4.
Weschke, Hugo, Dipl.-Wirtsch. 21.2.
Wiechert, Klaus, Dr.-Ing. 14.3.—14.3.6.

Quellennachweis für Abbildungen

Die Zeichnungen und Farbtafeln wurden vorwiegend nach Angaben der Autoren angefertigt von:
Bertholdt, Jochen, Rostock · Borleis, Jens, Leipzig · Künzelmann, Hans-Joachim, Dresden · Pippig, Gerhard, Großdeuben · Weitzmann, Willi, Leipzig · Zindler, Joachim, Leipzig

Wissenschaftliche Aufnahmen und Reproduktionen stellten zur Verfügung:
VVB Armaturen und Hydraulik, Leipzig · Bauakademie der DDR, Berlin · VVB baukema, Leipzig · Benjack, Ch., Leipzig · Boden, V., Leipzig · Foto-Brüggemann, Leipzig · VVB Chemieanlagen, Leipzig · Foto-Clauss, Leipzig · Crosfield Electronics Ltd., London · ČTK, Prag · Curth-Tabbert, Berlin · Czerny, Ch., Dresden · Deutsche Bauinformation, Berlin · Deutsche Reichsbahn, Berlin · Dewag-Werbung, Berlin, Leipzig · Foto-Deylig, Greiz · Dieck, H., Magdeburg · Eckstein, B., Leipzig · VEB Elektroschweißmaschinenwerk, Aue · Ender, K., Babelsberg · VEB Esda, Thalheim · VEB Fachbuchverlag, Leipzig · VEB RFT Fernmeldewerk, Leipzig · Fieguth, J., Berlin · Foto E & H Fischer, Westberlin · PGH Fotostudio, Leipzig · PGH Foto-Zentrum, Leipzig · Foto-Friedrich, Leipzig · VEB Galvanotechnik, Leipzig · Garbe, P., Berlin · VEB Geräte- und Reglerwerke, Teltow · GFF-Werbung, Dresden · Foto-Geuther, Rötha · VEB Hebebühnen, Lunzenau · Heine, K., Bautzen · Heintz, R., Rostock · Fa. Hell, Kiel · Lichtbild-Hempel, Karl-Marx-Stadt · Hempel, R., Berlin · Hensky, H., Berlin · Honeywell GmbH, Frankfurt/M. · Hopf, Baalsdorf · Huhle, P.-R., Leipzig · IBM Austria, Wien · Illner, G., Leipzig · Ittenbach, M., Berlin · Jäkel, St., Leipzig · Redaktion „Jugend und Technik", Berlin · Junge, P.-H., Berlin · Karl-Marx-Universität, Leipzig · Karsten, W., Taucha · Kind, W., Berlin · Klinikum Halle-Kröllwitz · Lange, B., Berlin · Lenke, A., Berlin · VEB LEW „Hans Beimler", Hennigsdorf · May, Dresden · Meister, R., Jena · Müller-Straube, Berlin · VVB RFT Nachrichten- und Meßtechnik, Leipzig · VEB Kombinat NAGEMA, Dresden · Verlag Neues Deutschland, Berlin · Presseagentur Nowosti, Berlin · VEB Kombinat ORSTA-Hydraulik · VEB Papiermaschinenwerke, Freiberg · Pfeil, S., Mügeln · VEB Kombinat Polygraph, Bautzen, Leipzig, Dresden · Rasch, Bergfelde · Foto-Richter, Leipzig · VEB Kombinat Robotron, Dresden · Foto-Römer, Karl-Marx-Stadt · Saurbrey, K.-H., Leipzig · VVB Schiffbau, Rostock · VEB Schleifmaschinenwerk, Karl-Marx-Stadt · Schmidtke, Potsdam · VEB Schwermaschinenbaukombinat „Ernst Thälmann", Magdeburg · VEB Kombinat Seeverkehr und Hafenwirtschaft, Rostock · Siemens Pressebild, München · Skoyan, M., Leipzig · Stache, P., Berlin · VEB Stahl- und Walzwerk, Brandenburg · VEB Steremat „Hermann Schlimme", Berlin · VVB TAKRAF, Leipzig · Tänzer, K., Dresden · VEB Verlag Technik, Berlin · Redaktion „Technische Gemeinschaft" der Kammer der Technik, Berlin · Technische Universität, Freiberg · VEB teltomat, Teltow · VEB Transformatoren- und Röntgenwerk, Dresden · VEB transpress Verlag/Heinz A. F. Schmidt-Archiv · Redaktion Tribüne · Foto Fritz Ukat, Berlin · VEB Kombinat Umformtechnik, Erfurt · Urania-Verlag, Leipzig, Berlin · Valmet Oy, Helsinki · VEB Werkzeugmaschinenkombinat „7. Oktober", Berlin · Redaktion „Wissenschaft und Fortschritt", Sammlung Naumann · VEB Carl Zeiss Jena · ADN-Zentralbild, Berlin · Zimmer, G., Leipzig

1. Bergbau

Der Bergbau als materielle Basis für weite Bereiche der Grundstoffindustrie und der Energiegewinnung befaßt sich mit Erkundung, Aufschluß, Gewinnung und Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen und von Energieträgern im weitesten Sinne, so z. B. auch von Baustoffen, chemischen Grundstoffen, Kernbrennstoffen usw. Im Bergbau angewandte Erkundungs- und Gewinnungsverfahren sind weitgehend abhängig von der Art und Ausbildung der Lagerstätten, von deren Teufenlage und vom Entwicklungsstand der Technik. Dem Bergbau zugeordnet werden zunehmend auch solche Arbeiten aus den Bereichen der Verkehrs-, Wasser- und Energiewirtschaft, sofern sie ausgesprochen bergbauliche Merkmale besitzen, z. B. Herstellung von Tunneln, Pumpspeicherwerken usw. Der Nachweis abbauwürdiger Lagerstätten erfolgt nach vorangegangenen geologischen und geophysikalischen Vorerkundungsarbeiten in erster Linie durch Bohrungen, die entweder von über oder unter Tage von bereits aufgefahrenen Grubenräumen aus angesetzt werden. Bei kompliziert ausgebildeten Lagerstätten, z. B. Gangerzvorkommen, sind teilweise auch bergmännische Erkundungsarbeiten in Form von Stollen, Schächten und Strecken erforderlich. Die Abbauwürdigkeit einer Lagerstätte hängt von ihrer geologischen Ausbildung, Gewinnbarkeit, Aufbereitbarkeit, von den Gewinnungskosten und den Preisen für Rohstoffe und Energieträger ab. Volkswirtschaftliche und strategische Bedeutung bestimmter Rohstoffe können ebenfalls entscheidende Faktoren für deren Abbau sein. Oberflächennahe Lagerstätten mit größerer Ausdehnung werden im Tagebau, d. h. in offenen Gruben gewonnen. Dies trifft vor allem für Braunkohlenlagerstätten, silikatische Rohstoffe und geeignete Erz- und Steinkohlenlagerstätten zu. Tagebaue werden gegenwärtig bis zu Tiefen von ≈ 500 m betrieben. In der Regel erlaubt der Tagebau eine verlustärmere Gewinnung der Lagerstätte als der Tiefbaubetrieb. Mit der ständigen Entwicklung leistungsfähigerer Gewinnungs- und Fördermechanismen wächst auch die Anwendungsmöglichkeit der Gewinnung im Tagebau. Der Tiefbau umfaßt gegenwärtig die Lagerstättengewinnung bis nahezu 4000 m Teufe. Die meisten Bergwerke arbeiten jedoch in Bereichen von 300 bis 1000 m Teufe.

Flüssige und gasförmige Lagerstätten werden fast ausnahmslos durch Bohrungen gewonnen. Dabei kann der eigentliche Gewinnungsvorgang, gekennzeichnet durch Strömungsvorgänge in porösen Gesteinen, nicht direkt beobachtet und auch nur bedingt meßtechnisch erfaßt werden. Gegenwärtig müssen bei der Gewinnung flüssiger und gasförmiger Rohstoffe noch hohe Abbauverluste in Kauf genommen werden. Diese durch verbesserte Gewinnungsverfahren drastisch zu reduzieren, ist eines der wichtigsten Ziele in Gegenwart und Zukunft.

Die Aufbereitung stellt die erste Verarbeitungsstufe bergbaulicher Rohstoffe mit dem Ziel dar, daraus Absatzprodukte zu erzeugen, an deren stoffliche Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften, vor allem hinsichtlich der Körnung, bestimmte Anforderungen gestellt werden. Dies wird durch an die Rohstoffeigenschaften angepaßte Aufbereitungsverfahren realisiert, die Kombinationen von notwendigen Prozessen, wie Zerkleinern, Klassieren, Sortieren, Laugen, Agglomerieren u. a., darstellen.

1.1. Suche und Erkundung von mineralischen Rohstoffen

Mineralische Rohstoffe werden in ihrer natürlichen Ablagerung in fester, flüssiger und gasförmiger Form angetroffen. Von ihrem physikalischen Zustand, ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften und ihrer vermuteten Tiefenlage werden wesentlich die Methoden bestimmt, mit denen sie gesucht und erkundet werden. Dabei versteht man unter Suche den Teil innerhalb des gesamten Erkundungsprozesses, der zunächst den Nachweis des Vorhandenseins von mineralischen Anreicherungen in der Erdkruste zu führen hat. Die Phase der Erkundung erbringt dann den Nachweis der Abbauwürdigkeit einer Lagerstätte und liefert gleichzeitig Informationen, die der Projektierung des zweckmäßigsten Gewinnungsverfahrens als Grundlage dienen. Gleichzeitig müssen die Belange der technischen

Sicherheit des Gewinnungsprozesses, der möglichst verlustlosen oder zumindest verlustarmen Gewinnung der Lagerstätte und die des Umweltschutzes optimal wahrgenommen werden. Dies bedeutet wiederum, daß die Such- und Erkundungstechnologie sich nicht ausschließlich auf die Mächtigkeit und die Qualität der Lagerstätte konzentrieren darf, sondern daß auch geologische, geomechanische und hydrologische Bedingungen der Hangend- und Liegendschichten und der Lagerstätte selbst mit erfaßt werden müssen.
Für verschiedene Lagerstättentypen gibt es unterschiedliche Einteilungen des Erkundungsprozesses. Man kann sie jedoch allgemein in folgende Hauptphasen untergliedern:
1. *geologisch-geophysikalische Erkundung,*
2. *bohrtechnische Such- und Erkundungsarbeiten.*
Die unter 2. genannten Untersuchungen sind wiederum gekoppelt mit geologisch-geophysikalischen Erkundungs- und Interpretationsmethoden.
Bergmännische Erkundungsarbeiten und kombinierte bergmännisch-bohrtechnische Untersuchungen können bei bestimmten Lagerstättentypen, die im untertägigen Betrieb abzubauen sind, zusätzlich noch erforderlich werden. Verschiedene Lagerstätten, wie z. B. Erdöl, Erdgas, Braunkohle, Salze, Steine und Erden, Grund-, Mineral- und Thermalwasser, werden ausschließlich durch geologisch-geophysikalische und bohrtechnische Methoden erkundet.

1.1.1. Geologische und geophysikalische Suchmethoden

Seit einiger Zeit sind die Aufgaben von Geologie und Geophysik bei der Suche und Erkundung von mineralischen Rohstoffen engstens miteinander verflochten. Nur in geologisch wenig erforschten, wenig bewachsenen und wenig bebauten Landstrichen kommt es noch häufiger vor, daß Lagerstätten durch Anzeichen auf der Erdoberfläche, z. B. Lesesteine, Ausstreichen von Erzgängen oder von Kohleflözen, Austritt von Erdgas, unmittelbar oder bei Ausschachtungsarbeiten erkannt und gefunden werden. Hinweise für das Vorhandensein bestimmter Lagerstätten können auch durch das Auftreten von mineralhaltigen Quellen und durch das Vorkommen gewisser Pflanzen, z. B. des Galmeiveilchens auf zinkhaltigen Böden, oder durch Verfärbungen des Bodens bei Ausstreichen von Eisen- und Manganerzlagerstätten gewonnen werden. Im allgemeinen muß die Lagerstättensuche und -erkundung durch planmäßige und systematische geologisch-geophysikalische Untersuchungsarbeiten, unterstützt durch die Bohrtechnik und z. T. durch bergmännische Maßnahmen, betrieben werden.
In neuester Zeit gewinnt auch die geologische Erkundung aus der Luft durch Hubschrauber, Flugzeuge und Satelliten zunehmend an Bedeutung. Mit leistungsfähigen Aufnahmegeräten können über weite Flächen Großstrukturen nachgewiesen werden, die wiederum Hinweise auf das Vorhandensein von Lagerstätten geben können. Die Erkundungstätigkeit unter Verwendung von Flugkörpern ist von besonderer Bedeutung für schwer zugängliche Gebiete und für Gegenden, in denen extreme klimatische Bedingungen vorherrschen.
Hierbei erweisen sich in zunehmendem Maße künstliche Erdsatelliten für die Fernerkundung als besonders geeignet. Durch ihre Flughöhe können jeweils relativ große Abschnitte der Erdoberfläche erfaßt und abgebildet werden. Die Aufnahmekameras sind so weit entwickelt, daß trotz der Flughöhe gestochen scharfe Bilder gewonnen werden. Satelliten haben weiterhin den Vorteil, daß die Aufnahmen beliebig oft wiederholt werden können, so daß störende Einflüsse durch Wolkenfelder bei einer Wiederholungsaufnahme ausgeschaltet werden können. Beim Einsatz sowjetischer Raumstationen wurde die in der DDR entwickelte Multispektralkamera MKF-6 bzw. MKF-6M benutzt (Tafel 47). Von den USA wurde im Rahmen des EROS-Programms eine ähnliche Aufnahme- und Auswertetechnik von Satellitenbildern entwickelt.
Kennzeichnend für die Multispektraltechnik ist die Aufspaltung des Lichtspektrums in mehrere, bei der MKF-6 in 6 Bereiche (Kanäle). Dies erfolgt durch unterschiedliche Filterung des Lichts. Die jeweils gleichzeitig aufgenommenen 6 Bilder sind deckungsgleich und erfassen den gleichen Abschnitt der Erdoberfläche. Die Auswertung des Bildmaterials erfolgt durch Projizierung mit farbigem Licht. Hierdurch werden feinste Helligkeitsunterschiede und damit detaillierte Strukturen und Besonderheiten auf der Erdoberfläche für das menschliche Auge überhaupt erkennbar. Zahlreiche Fragen der Betrachtung der Erdoberfläche der Verschmutzung von Gewässern, der Vereisung, jedoch auch der Ausbildung geologischer Strukturen lassen sich mit diesem Bildmaterial klären und interpretieren. Hieraus lassen sich entweder unmittelbar oder in komplexer Auswertung mit geophysikalischen Meßergebnissen, die entweder auch aus der Luft oder von der Erdoberfläche aus gewonnen werden, Hinweise auf das Vorhandensein nutzbarer Lagerstätten ableiten.
Außerordentlich gute Resultate wurden beim Verfolgen von tektonischen Störungen und kreis- und ringförmigen Strukturen (z. B. Diapire, Plutone) erzielt. Der direkte Lagerstättennachweis ist bisher nur in überwiegend vegetationslosen Gebieten (besonders Küstengebieten Mittelasiens und des südlichen Afrika) gelungen. Hier waren es vor allem hydrothermale Ver-

änderungen, die sich mit verschiedenen analog-optischen bzw. numerischen Verfahren nachweisen ließen.
Der Nachweis der Abbauwürdigkeit einer Lagerstätte kann um so treffender geführt werden, je komplexer die geologisch-geophysikalischen, bohrtechnischen und bergmännischen Methoden angewandt und interpretiert werden.
Geologische Suchmethoden. Durch *geologisches Kartieren* wird festgestellt, welche Gesteinsformationen über Tage anstehen; dabei kann es häufig erforderlich werden, den Mutterboden und verwitterte Schichten durch sog. *Schürfarbeiten*, d. h. Herstellen von Gräben, bis zum festen Gebirge abzutragen und dieses freizulegen. Hierdurch sind nach über Tage ausstreichende Lagerstätten erkennbar; vor allem kann jedoch das Alter der obersten Schichten und damit die mögliche weitere Schichtenfolge ermittelt werden. Hieraus sind Hinweise gewinnbar, ob Lagerstätten vorhanden sein können, deren Entstehung an ein bestimmtes geologisches Alter gebunden sind. An übertägigen „Aufschlüssen", wie Steinbrüchen, Sandgruben, an erodierten Abhängen u. ä., können Erkenntnisse über die Ablagerungsbedingungen, tektonische Erscheinungen, wie Faltungen, Verschiebungen, Brüche, und weitere Störungen gewonnen werden. Als *höffig* wird ein Gebiet bezeichnet, in dem Anzeichen und Voraussetzungen für das Vorhandensein bestimmter Lagerstätten gegeben sind. Als *fündig* bezeichnet man eine Untersuchung, die eine Lagerstätte nachweisen konnte.
Geophysikalische Untersuchungsmethoden (Abb. 1.1.1-1, 1.1.1-2) kann man unterscheiden in solche, die einerseits von der Oberfläche, vom Flugzeug oder von Satelliten aus angewendet werden, und in solche, die in Bohrlöchern zum Einsatz gelangen. In ihren physikalischen Grundprinzipien unterscheiden sie sich jedoch kaum voneinander. Es handelt sich generell um Methoden, die bestimmte Gesteinseigenschaften bzw. Eigenschaften der Schichten meßtechnisch erfassen, wobei die Ergebnisse dann geologisch zu interpretieren sind. Mit geophysikalischen Me-

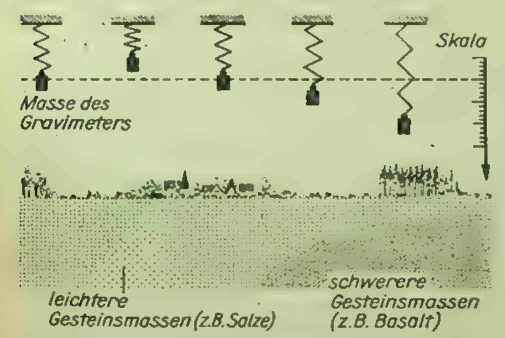


Abb. 1.1.1-1 *Prinzip gravimetrischer Messungen von Dichteunterschieden des Untergrunds*

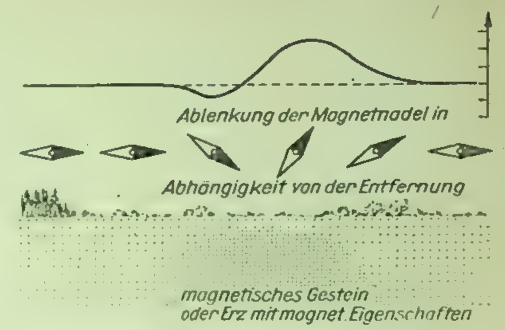


Abb. 1.1.1-2 *Prinzip magnetischer Messungen des Untergrunds*

thoden kann ein *Direktnachweis* für das Vorhandensein bestimmter Lagerstätten nicht geführt werden. Es werden lediglich Hinweise für das Vorhandensein von Lagerstätten gewonnen, die allerdings durch eine komplexe Anwendung und Interpretation verschiedener Methoden verdichtet werden können (Tab. 1.1.1-3).

Tab. 1.1.1-3 *Übersicht über die wichtigsten geophysikalischen Untersuchungsmethoden bei der Suche und Erkundung mineralischer Rohstoffe*

geophysikalische Methode	Messung von Gesteinseigenschaften	geeignet zum möglichen Nachweis für
Gravimetrie[1]	Unterschiede in der Gesteinsdichte	Salzgesteine, Granite, Erzkörper, indirekt auch geeignet für Erdöllagerstätten, weil diese oft an den Flanken von Salzaufpressungen auftreten können
Magnetik[1]	magnetische Eigenschaften von Gesteinen	magnetische Eisenerze
Elektrik	Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit der Gesteine	Buntmetallerze
Seismik	Laufzeit elastischer Wellen	Nachweis von Schichtenmächtigkeit, Schichteinfallen von Störungen, Faltungen usw. Nachweis von Dichteunterschieden, Hinweise auf Braunkohle, Salzgesteine, Erdöl, Erdgas
Radiometrie	Radioaktivität der Gesteine	radioaktive Erze, besonders Uranerze

[1] Diese Verfahren werden auch bevorzugt von Hubschraubern, Flugzeugen und Satelliten aus angewendet.

Den effektiven Nachweis der Lagerstätte, vor allem nach Quantität und Qualität, kann vorerst nur der bergmännische oder der bohrtechnische Aufschluß liefern.

1.1.2. Bohrtechnische Such- und Erkundungsverfahren

Die geologischen und geophysikalischen Untersuchungen (vgl. 1.1.1.) liefern Hinweise für den zweckmäßigen Ansatzpunkt für Such- und Erkundungsbohrungen. Bohrtechnische und bergmännische Untersuchungsmethoden sind aufwendiger als geologische und geophysikalische. Insbesondere muß bei tiefliegenden Lagerstätten, die auch tiefe und kostspielige Bohrungen erfordern, eine möglichst umfassende geologisch-geophysikalische Vorerkundung vorausgehen. Zur Anwendung gelangen fast ausnahmslos konventionelle, rotierend arbeitende Bohrverfahren. Sie gewährleisten am besten die Gewinnung von repräsentativen und unverfälschten Boden- und Gesteinsproben.
Hinsichtlich der *Gesteinszerstörung* auf der Bohrlochsohle unterscheidet man das sog. *Voll-* und das *Kernbohren*. Bei der erstgenannten Methode wird das gesamte auf der Bohrlochsohle anstehende Gestein zerstört. Irgendwelche Gesteinsproben können nur in Form von Bohrgutteilchen aus der Bohrspülung entnommen werden. Beim *Kernbohren* werden zylindrische Gesteinsproben bis zu 18 m Länge und mehr unter Verwendung einer Kernbohrgarnitur gewonnen. Demzufolge sind vor allem das sog. *Trockenbohren* und das *Rotarybohren* die am weitesten verbreiteten Erkundungsbohrverfahren.
Bei Such- und Erkundungsbohrungen steht die Aufgabe im Vordergrund, optimale Aussagen über die durchbohrten Schichten zu gewinnen. Dennoch müssen auch diese Bohrungen nach strengen ökonomischen Kriterien niedergebracht werden. Die *Bohrlochkonstruktion* ist praktisch das Verrohrungsschema einer Bohrung. Sie ist vor allem bei tiefen Bohrungen von großer Bedeutung. Sie schützt die Bohrung während des Niederbringens und auch bei der späteren Nutzung, z. B. als Erdöl- oder Erdgasförderbohrung, vor Nachfall und Zusammenbruch. Die Bohrlochkonstruktion hat die Aufgabe, Schichten voneinander zu trennen, die infolge ihrer unterschiedlichen Eigenschaften nicht in einem Bohrintervall durchbohrt werden dürfen, z. B. Schichten mit hohem und solche mit niedrigem *Porendruck*. Außerdem muß die Verrohrung jeweils so tief eingebracht sein, daß bei Antreffen einer *Hochdruckformation* und bei der Notwendigkeit, das Bohrloch kurzzeitig oben verschließen zu müssen, der sich dann im Bohrloch aufbauende Druck nicht imstande sein darf, das Bohrloch unterhalb des untersten Rohrschuhs, dem Rohrende, aufzureißen und die Lagerstättensubstanz über vertikal aufgerissene Klüfte über Tage neben dem Bohrloch austreten zu lassen. Das Verrohrungsschema ist für die technische Durchführung einer Bohrung und für die anfallenden Kosten einer der entscheidendsten Faktoren.
Unter dem Begriff des *Bohrregimes* werden die Parameter verstanden, die für die Steuerung des Bohrprozesses von Bedeutung sind. Es sind dies: die mechanischen Parameter *Bohrwerkzeugbelastung* (*Bohrdruck*), *Drehzahl* und *-moment* sowie die hydraulischen und rheologischen Parameter *Spülungsgeschwindigkeit*, *-druck*, *-dichte*, *Viskosität*, *Gelstärke* u. a.
Als optimales Bohrregime gilt die Wahl solcher Parameter, die bei geringsten Bohrmeterkosten max. Bohrleistungen erreichen lassen. Die Bohrtechnik, insbesondere die Tiefbohrtechnik, hat in den vergangenen 10 Jahren einen tiefgreifenden Verwissenschaftlichungsprozeß erfahren, der gekennzeichnet ist durch eine hochentwickelte Bohrprozeßmeßtechnik, wobei die gemessenen Daten im günstigsten Falle unmittelbar im Computer verarbeitet und die Ergebnisse sofort in den laufenden Bohrprozeß eingesteuert werden.
Bohrverfahren. Beim *Trockenbohren* wird ohne im Bohrloch zirkulierende Spülung gearbeitet. Es ist geeignet zur Erkundung von Lagerstätten im lockeren bzw. wenig verfestigten Gebirge sowie für die Grundwasseruntersuchung in Tiefen bis ≈ 150 m. Die eingesetzten Bohrwerkzeuge richten sich nach dem anstehenden Gebirge (Abb. 1.1.2-1).
Für Such- und Erkundungsarbeiten im festen Gebirge eignet sich am besten das mit einer zirkulierenden Bohrspülung arbeitende *Rotaryverfahren*. Entscheidend für die optimale Lösung der Erkundungsaufgabe sind vor allem das eingesetzte Probenahmewerkzeug und die im Bohrloch angewendeten geophysikalischen Meßmethoden.
Bohrverfahren, die das Gestein durch thermische Beanspruchung, Erosion, Ultraschall o. a. Einwirkungen zerstören, sind entweder noch nicht

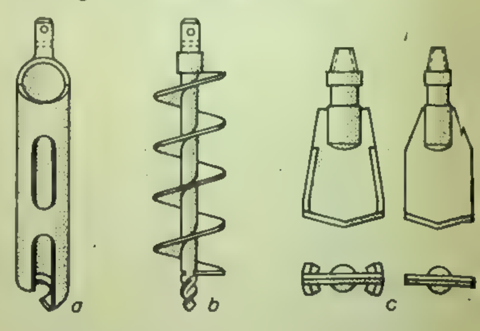


Abb. 1.1.2-1 ***a*** *Schappe und* ***b*** *Spiralbohrer für bindige Schichten,* ***c*** *Blattmeißel für feste Gesteinsbänke*

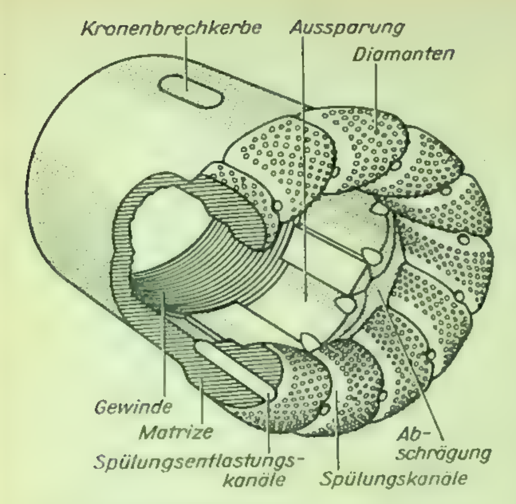


Abb. 1.1.2-2 *Diamantkrone*

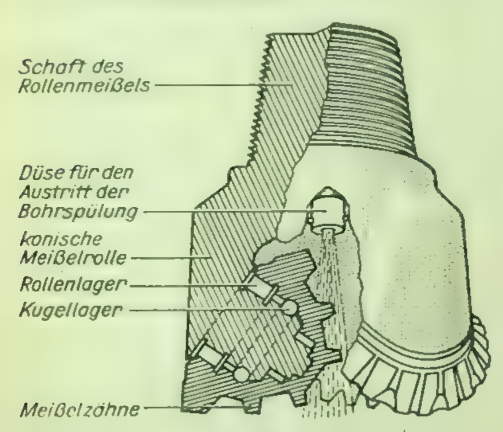


Abb. 1.1.2-3 *Rollenmeißel*

zur industriellen Reife gelangt oder sie eignen sich nicht für Erkundungsbohrungen, weil bei ihrer Anwendung die durchbohrten Gesteine nicht in ihrem natürlichen Zustand erhalten bleiben oder weil sie keine auswertbaren Gesteinsproben liefern können. Die Anwendung von *Bohrlochsohlenmotoren* für Such- und Erkundungsbohrungen hat sich kaum bewährt, weil mit diesen Ausrüstungen gut verwertbare Bohrproben ebenfalls nicht gewinnbar sind.

Für das Vollbohren im Festgestein sind in allen Tiefenbereichen neben *Diamant-* (Abb. 1.1.2-2) die *Rollenmeißel* (Abb. 1.1.2-3) zu Standardbohrwerkzeugen geworden. Letztere besitzen beweglich angebrachte, konisch ausgebildete Rollen, an denen als gesteinszerstörende Elemente Meißelzähne unterschiedlicher Größe, Form und Werkstoffgüte angebracht sind (Tafel 4). Für harte bis extrem harte Gesteine sind anstelle der Meißelzähne zahnförmige Hartmetallstifte angebracht. Zum überwiegenden Teil werden Dreirollenmeißel eingesetzt, bei denen die Rollen entweder durch Kugel- und Rollen- oder durch Gleitlager beweglich mit dem Meißelkörper verbunden sind.

Meißelzähne und -rollenlager sind die Hauptverschleißelemente des Rollenmeißels, der dann optimal genutzt ist, wenn Meißelzähne und -rollenlager den gleichen Verschleißgrad aufweisen.

Bohren nach oberflächennahen Lagerstätten. Untersuchungsmethodik und eingesetzte Ausrüstung werden wesentlich von den Eigenschaften der zu durchbohrenden Gesteine und von den Ablagerungsbedingungen der Lagerstätten beeinflußt.

Flächenmäßig, flözartig ausgebildete Lagerstätten von Braunkohle, Grundwasser, Steine und Erden usw. im lockeren Gebirge werden durch vertikale Bohrungen mit relativ großem Durchmesser erkundet (Tafel 2), wobei eine Verrohrung solcher Bohrungen als Schutz gegen Nachfall häufig notwendig wird. Eingesetzt werden Trockenbohrgeräte oder leichte bis mittlere Rotaryanlagen. Die Probenahme beim Trockenbohren erfolgt durch verschiedene Werkzeuge, die Bohrproben von unterschiedlicher Qualität liefern und deren Ausbildung abhängig davon ist, ob die Probe aus kohäsionslosen lockeren Schichten, wie Sand, Kies, Schluff, weiche Braunkohle, oder aus sog. bindigen Schichten, wie Ton, Lehm, zu gewinnen ist.

Größere und zusammenhängende Proben mit hoher Vollständigkeit liefert vor allem das Rotaryverfahren unter Verwendung von *Bohrkronen* und *Kernrohren*. Eine Kernbohrgarnitur besteht aus folgenden Hauptteilen: Bohrkrone, Kernrohr mit -fänger (vgl. Abb. 1.1.2-1). Das Kernrohr dient der Aufnahme des Bohrkerns und wird in verschiedenen Längen, oftmals abgestimmt mit der zu erwartenden Lebensdauer des Bohrwerkzeugs, eingesetzt.

Man unterscheidet *Einfach-* und *Doppelkernrohre* (Abb. 1.1.2-4). Bei letzteren rotiert das Innenkernrohr nicht mit. Die Bohrspülung strömt durch den Ringraum zwischen Außen- und Innenkernrohr. Auf diese Weise kann der Bohrkern weder durch die sonst erodierend wirkende Bohrspülung noch durch die Rotation des Kernrohrs beschädigt werden. Nach Abbohren der vorgesehenen Kernstrecke wird der Bohrstrang angehoben. Hierbei verklemmt sich der Kernfänger mit dem Bohrkern, so daß dieser vom anstehenden Gebirge abgerissen wird und zusammen mit dem auszubauenden Bohrstrang ausgebaut werden kann.

Bei *Seilkernrohren* kann das Innenkernrohr mit dem Bohrkern ohne Ausbau des Bohrstrangs an die Oberfläche gebracht werden.

Kernrohre für orientierten Kerngewinn gestatten, die Lage des Bohrkerns im Gebirge nach

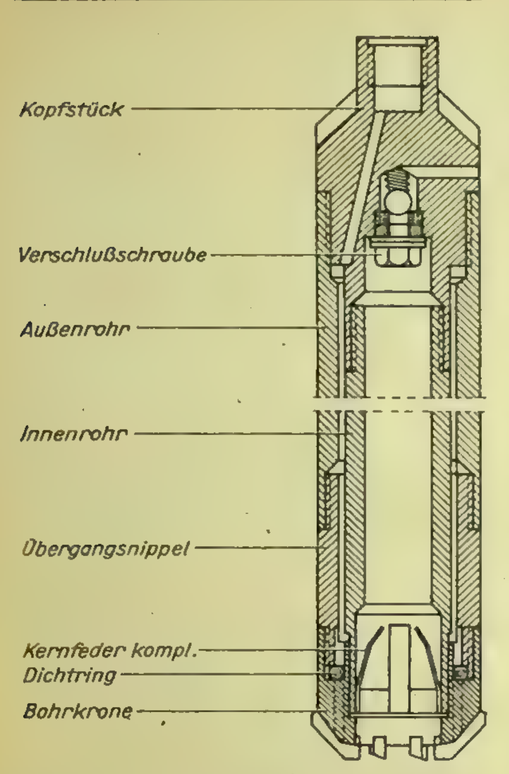


Abb. 1.1.2-4 Kernrohrgarnitur (Doppelkernrohr)

Azimut und Neigung zu bestimmen und besitzen daher höhere Aussagekraft.
Schürfbohrgeräte sind für Such- und Erkundungsbohrungen in geringen Tiefen eingesetzte Bohrausrüstungen. Unter *Schürfen* versteht man generell die Suche nach nutzbaren Lagerstätten. Schürfbohrgeräte sind so konstruiert, daß mit ihnen in beliebigen Richtungen gebohrt werden kann. Daher eignen sich solche Geräte besonders gut für die Erkundung schräg einfallender und gangförmiger Lagerstätten sowie für die Lagerstättenerkundung von untertägigen Grubenräumen aus.
Da das Kernbohren in der Regel teurer ist und einen langsameren Bohrfortschritt ergibt als das Vollbohren, müssen bei der Projektierung von Erkundungsbohrungen sorgfältig die Bohrstrecken festgelegt werden, die gekernt werden sollen.
Mit *Seitenkernschußgeräten* können auch aus voll durchgebohrten Strecken kurze Kernstücke aus der Bohrlochwand herausgeschossen werden. Aus der Sicht moderner Gewinnungsverfahren beim Abbau von Lagerstätten mineralischer Rohstoffe müssen vor allem auch die geomechanischen Eigenschaften nicht nur der Lagerstätte selbst, sondern auch der Hangendschichten erkundet werden, um deren Verhalten bei der Lagerstättengewinnung zu kennen und daraus Erkenntnisse über das zweckmäßige Gewinnungsverfahren und für die gesamte Abbauführung zu erhalten.
Bohren nach tief- und extrem tiefliegenden Lagerstätten. Sieht man von Ausnahmen ab, wie z. B. dem Gold- und Diamantbergbau in Südafrika, Indien und wenigen anderen Ländern, so geht der übrige Bergbau in Tiefen, die oberhalb von 1 500 m liegen. Gänzlich anders verhält es sich bei Erdöl-Erdgaslagerstätten, die auch in Tiefen > 5000 m zu finden sind. Die bisher tiefste Bohrung in den USA hat 1974 9 353 m erreicht. Die tiefste Bohrung liegt in der UdSSR bei über 9 600 m, in der DDR wurden 8 000 m überschritten. Entscheidend für die bei *Tiefbohrungen* auftretenden Probleme ist jedoch nicht allein die absolute Tiefe der zu erreichenden geologischen Formationen, sondern mindestens ebenso sehr sind es deren mechanische Eigenschaften, der Druckgradient der in den Poren- und Klufträumen von Sedimentgesteinen befindlichen fluiden Medien, wie Öl, Gas, Lauge, Wasser, die auch in mehreren Komponenten vorhanden sein können, und schließlich auch der Gradient der geothermischen Tiefenstufe, der bei anormalen Bedingungen die Hauptschwierigkeit bilden kann. Bei den zu durchbohrenden Gesteinen ist es vor allem deren inelastisches Verhalten, das zum Zuwachsen des Bohrlochs unter Festwerden des Bohrstrangs und zu den damit verbundenen, schwer zu behebenden Havarien führen kann.
Beim *„balancierten Bohren"* werden die Spülungsparameter, insbesondere die Spülungsdichte, so gewählt, daß sie mit den Drücken fluider Medien in den Poren- und Klufträumen der Sedimentgesteine bzw. mit dem Gebirgsdruck etwa im Gleichgewicht stehen. Auf diese Weise wird erreicht, daß weder fluide Medien aus den Bohrlochwänden in den Ringraum der Bohrung eintreten können, noch daß sich das Gebirge in Richtung Bohrlochmitte inelastisch verformen kann, oder daß Spülung ins Gebirge eindringen, Spülungsverluste hervorrufen und die Lagerstätte durch Verstopfen der Porenräume im bohrlochnahen Bereich schädigen kann. Da nicht von vornherein die Druckzustände in den einzelnen Schichthorizonten bekannt sein können, besitzen moderne Bohrausrüstungen solche Einrichtungen, die in der Lage sind, bei Auftreten eines Ungleichgewichts im Bohrloch automatisch durch Veränderung der Spülungsdichte und durch Aufgabe von Gegendruck in den Ringraum des Bohrlochs das Gleichgewicht wieder herzustellen. Temperatureinflüsse aus dem Gebirge können nur aufgrund der kühlenden Wirkung der Bohrspülung durch die Bildung eines Temperaturausgleichsmantels im bohrlochnahen Bereich beherrscht werden.
Bohren mit „reiner Bohrlochsohle". Hierbei wird die Spülungszirkulation im Bohrloch so

gestaltet, daß das erbohrte Gestein möglichst ohne weitere Nachzerkleinerung von der Bohrlochsohle abtransportiert und im Ringraum nach über Tage ausgetragen wird.
Mehr noch als bei der Lagerstättensuche und -erkundung in geringen Tiefen muß bei der Tiefenerkundung ein komplexes Untersuchungsprogramm unter Einbeziehung geophysikalischer Bohrlochmeßmethoden und unter Nutzung der Bohrfortschrittsdaten für die Lagerstätten und die Erkundung der Hangend- und erforderlichenfalls der Liegendschichten projektiert werden.
Sicherheitsarmaturen, auch *Preventer* genannt, werden auf die Bohrlöcher montiert, um bei kritischen Situationen, z. B. durch Einströmen von Gas und Öl aus Hochdruckhorizonten, das Bohrloch verschließen zu können, Eruptionen, die oft mit verheerenden Bränden verbunden sein können, zu vermeiden und den Normalzustand wiederherzustellen.
Gestängepreventer können das Bohrloch verschließen, solange sich noch der Gestängestrang im Bohrloch befindet.
Vollabschlußpreventer (Abb. 1.1.2-5) können das Bohrloch bei ausgebautem Bohrstrang verschließen.
Universalpreventer sind geeignet, um bei abgeschlossenem Bohrloch noch eine kurze Strekke, z. B. bis zum vollständigen Durchbohren einer angebohrten Lagerstätte, weiterbohren zu können. Die Preventer sind so konstruiert, daß sie automatisch von einer Stelle aus geschlossen werden können, die außerhalb des Gefahrenbereichs liegt, der beim Einsturz des Bohrturms entstehen kann.
Bohrlochabdichtung. Um zu verhindern, daß unter Hochdruck stehende fluide Medien aus Poren- und Klufträumen in darüberliegende Schichten eindringen können, müssen die Ringräume zwischen Bohrlochwand und eingebauten Futterrohren unter Verdrängung der Bohrspülung sorgfältig und zuverlässig durch eine Zementsuspension ausgefüllt werden. Die qualitätsgerechte Ausführung derartiger Zementationen erfolgt nach Vorbereitungsarbeiten im Laboratorium unter simulierten in-situ-Bedingungen in der Regel durch Spezialbetriebe. Von ihr hängt wesentlich der störungsfreie Betrieb einer fündig gewordenen und als Fördersonde ausgebildeten Bohrung ab.
Zu den Bestandteilen des Bohrstrangs bei Tiefbohrungen zählen Schwerstangen, Stabilisatoren, Stoßdämpfer und Protektoren.
Schwerstangen bestehen aus verdicktem Bohrgestänge und verlagern den Schwerpunkt des Bohrstrangs möglichst weit nach unten. Dadurch wird nur der untere Teil des Bohrstrangs zur Herstellung der notwendigen Bohrwerkzeugbelastung auf Druck beansprucht, während der übrige Teil des Bohrstrangs sich unter Zugbeanspruchung befindet.
Stabilisatoren sind auf dem Schwerstangenstrang befindliche, zumeist hartmetallgepanzerte

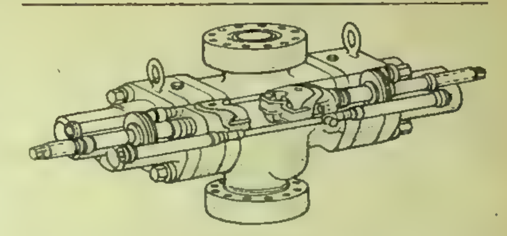


Abb. 1.1.2-5 Backenpreventer

Rippen, die den Bohrstrang an den Bohrlochwänden abstützen und dazu beitragen, größere Bohrlochabweichungen von der Vertikalen zu vermeiden.
Stoßdämpfer werden häufig dicht oberhalb des Bohrmeißels im Bohrstrang angebracht. Sie verhindern, daß beim Bohren am Meißel auftretende Schwingungen und Vibrationen auf den gesamten Bohrstrang übertragen werden und diesen ungünstig beanspruchen können.
Protektoren sind auf das Bohrgestänge aufgebrachte, ebenfalls rippenförmig ausgebildete Stützelemente, die sich in den Bereichen befinden, die im Bohrloch bereits durch Futterrohre ausgekleidet sind. Sie verhindern den Verschleiß und die Beschädigung von Futterrohren und Gestänge, indem deren unmittelbare Berührung, insbesondere bei Bohrlöchern, die von der Vertikalen abgewichen sind, verhindert bzw. gemindert wird.
Spülungstechnik. Die ***Bohrspülung*** hat insgesamt die Aufgabe, ein möglichst schnelles und havariefreies Niederbringen der Bohrung zu gewährleisten. Hieraus ergeben sich folgende Einzelaufgaben:

- Reinigung der Bohrlochsohle, Austrag des Bohrgutes aus dem Bohrloch,
- Kühlung und Schmierung des Bohrwerkzeugs,
- Kühlung des Gebirges, besonders bei hohen Gebirgstemperaturen,
- Abstützung der Bohrlochwände,
- Verhinderung von Nachfall und Einsturz des Bohrlochs,
- Verhinderung des Eintritts fluider Medien aus den Poren- und Klufträumen ins Bohrloch,
- Antrieb von hydraulisch wirkenden Bohrlochsohlenmotoren, sofern diese eingesetzt werden.

Bohrspülungen können flüssig oder gasförmig sein.
Luftspülung kann in der Regel nur in wasserfreiem Gebirge oder bei minimalen Wasserzutritten und zuverlässig standfesten Bohrlochwänden angewendet werden. Ihre Anwendung verspricht das Erreichen größerer Bohrgeschwindigkeiten bei sonst gleichen Bohrparametern.
Außer Bohrspülungen auf Wasserbasis gibt es noch solche auf Ölbasis. Letztere bewähren sich

vor allem beim Durchbohren von Kohlenwasserstofflagerstätten. Bei ihrer Anwendung wird das Eindringen von Wasser und Feststoffteilchen in die Poren- und Kluftträume vermieden und damit auch eine Schädigung der Lagerstätte im bohrlochnahen Bereich. Zunehmend an Bedeutung gewinnen weiterhin die feststoffarmen Spülungen, die auf der Basis hochpolymerer Verbindungen aufgebaut sind und bevorzugt bei Erdöl-Erdgasbohrungen eingesetzt werden.

Die wichtigsten Spülungsparameter sind:

Spülungsdichte zur Ausübung eines Gegendrucks auf die Bohrlochwände und damit zur Kompensierung des Lagerstättendrucks flüssiger und gasförmiger Medien sowie zur Kompensierung des Gebirgsdrucks;

Trichterauslaufzeit, mit der die plastische Viskosität und die Gelstärke der Spülung ermittelt werden können. Unter Viskosität versteht man die sog. innere Reibung bei der strömenden Bewegung einer Spülflüssigkeit. Sie beeinflußt wesentlich einen Teil der hierbei auftretenden Fließwiderstände. Die Gelstärke ist die Festigkeit der Gelstrukturen in der Spülung.

Thixotropie ist die Eigenschaft einer Flüssigkeit, im Ruhezustand gelartig zu erstarren und bei erneutem Strömen ohne wesentliche Energiezufuhr wieder in den flüssigen Zustand überzugehen. Bohrspülungen mit thixotropen Eigenschaften halten bei Unterbrechung der Spülungszirkulation im Bohrloch die im Spülungsstrom befindlichen Feststoffteilchen in Schwebe; sie vermeiden deren Absinken und damit die Gefahr des Festwerdens des Bohrstrangs.

Wasserabgabe ist die Eigenschaft poröser Gesteinsschichten, beim Vorbeiströmen der Spülflüssigkeit Wasser auszufiltern, das in das Gebirge eintritt, wobei an den Bohrlochwänden gleichzeitig eine Tonkruste (Filterkruste) entsteht.

Sofern im Bohrloch besondere Bedingungen vorherrschen, z. B. hohe Temperaturen, Zutritt von Laugen usw., muß die Spülung Zusätze erhalten, die sie gegen derartige Einflüsse widerstandsfähig machen. So wird z. B. durch Zugabe von Schutzkolloiden das Zusammenbrechen oder Ausflocken von Tonspülung bei Zutritt salzhaltiger Flüssigkeiten verhindert.

Salzschichten werden grundsätzlich mit einer gesättigten Salzlösung als Spülung oder mit Luftspülung durchbohrt, um Auswaschungen und Kavernenbildung an den Bohrlochwänden zu vermeiden.

Suche und Erkundung von Kohlenwasserstofflagerstätten in Schelfgebieten. Die den Küstenregionen vorgelagerten Schelfe besitzen im wesentlichen den gleichen geologischen Aufbau, wie das küstennahe Festland. Die Suche und Erkundung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten in den *Schelfgebieten* der Weltmeere gewinnt daher zunehmende Bedeutung. Gegenüber dem Bohren auf dem Festland unterscheidet sich das Meeresbohren in erster Linie durch die Gründungskonstruktion des Bohransatzpunkts und durch die konstruktive Gestaltung des Bohrlochkopfs, d. h. des Bohrlochabschlusses am oberen Ende des Bohrlochs, und schließlich durch die Armaturen, die bei der späteren Gewinnung von Erdöl oder Erdgas aus fündigen Bohrlöchern erforderlich sind.

Gründungskonstruktionen für Meeresbohrungen werden je nach Wassertiefe und Entfernung vom Festland so gewählt, daß von dieser aus Such- und Erkundungsbohrungen und bei Auffinden einer Lagerstätte die Fördersonden niedergebracht werden können. Dementsprechend unterscheidet man:

– *künstlich aufgeschüttete Inseln*,

– *Estakaden*, d. h. eingerammte vertikale Rohre mit darauf aufgebauten Plattformen für Transport und Aufstellung der Bohranlage und für die Unterbringung erforderlicher Zusatzausrüstungen,

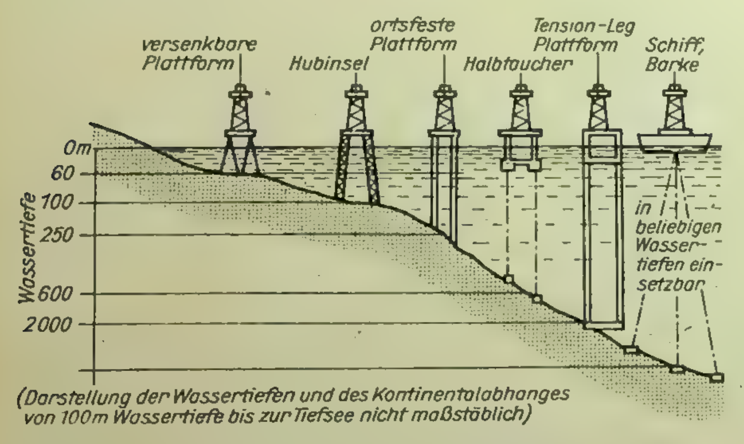


Abb. 1.1.2-6 Gründungsvarianten für Meeresbohrungen

– *Bohrinseln* mit ausfahrbaren, auf dem Meeresboden aufsetzbaren Hubbeinen,
– *halbtauchende Bohrinseln* mit Verankerungen am Meeresboden,
– *Bohrschiffe*, die ihre Position mit Hilfe von Satelliten ermitteln. Erforderliche Korrekturen zur Einhaltung der vorgegebenen Position über dem Bohransatzpunkt erfolgen durch computergesteuerte, zusätzlich am Bohrschiff angebrachte Manövriersysteme (Abb. 1.1.2-6).

Die Bohrlochabschlußarmaturen werden entweder unmittelbar über dem Meeresboden, d. h. unter Wasser, installiert, oder sie werden bis zur Bohrplattform hochgeführt. Dieser Armaturenkomplex wird international als *Riser* bezeichnet. Moderne Meeresbohrkonstruktionen sind für extreme maritime und klimatische Verhältnisse entwickelt. In der Nordsee sollen sie z. B. in der Lage sein, einem sog. Jahrhundertsturm standzuhalten, wobei mit Windgeschwindigkeiten bis 120 km/h und Wellenhöhen bis zu 30 m gerechnet wird. Die Meeresbohrtechnik ist in den meisten Fällen um ein mehrfaches teurer als das Bohren vom Festland aus. Demzufolge können nur solche Lagerstätten eine wirtschaftliche Gewinnung erwarten lassen, die in ihrer flächenmäßigen Ausdehnung sehr groß und sehr ergiebig sind.

Im Jahre 1978 wurde in den Schelfgebieten von 54 Ländern nach Erdöl und Erdgas gebohrt, wobei insgesamt ≈ 450 Bohrinseln und -schiffe im Einsatz sind. Bis zum Jahre 1990 sollen ≈ 30% der Welterdölförderung aus Meereslagerstätten gewonnen werden (Tafel 4).

Bei den Such- und Erkundungsbohrungen werden ansonsten die gleichen Bohrverfahren eingesetzt wie beim Bohren auf dem Festland. Es dominiert das Rotarybohren. Bohrlochsohlenmotoren, insbesondere Bohrturbinen, werden in der Regel nur in solchen Bohrlochabschnitten eingesetzt, in denen ein Kerngewinn nicht vorgesehen ist. Bei einigen Lagerstätten werden jedoch die Förderbohrungen als sog. *Richtbohrungen*, d. h. mit größeren Abweichungen, niedergebracht, um mehrere erdölführende Horizonte jeweils selektiv, d. h. getrennt, fördern zu können.

1.1.3. Komplexe Auswertung und Interpretation gewonnener Untersuchungsergebnisse

Die wachsenden Anforderungen, bei vertretbaren Kosten aus Bohrlöchern maximale Informationen zu gewinnen, erfordern neben einer hohen Qualifikation der hierfür eingesetzten Arbeitskräfte hochwertige Meß- und Interpretationsausrüstungen. Dabei müssen vor allem die Ergebnisse verschiedener Untersuchungsmethoden komplex ausgewertet werden.

Tab. 1.1.3-1 faßt die verschiedenen Informationsquellen, die beim Niederbringen von Bohrungen anfallen, zusammen. Hieraus ist zu erkennen, daß nach wie vor der direkte Nachweis von Lagerstätten durch die unmittelbare Untersuchung von Gesteinsproben sowie von Proben der flüssigen und gasförmigen Medien, die aus den Kluft- und Porenräumen der Gesteine stammen, erfolgen muß. Je mehr jedoch die verschiedenen geophysikalischen Meßmethoden gleich-

Tab. 1.1.3-1 *Übersicht über direkte und geophysikalische Meßverfahren zur Beurteilung der Eigenschaften des durchbohrten Gebirges*

Untersuchungsgegenstand	direkte Meßverfahren	geophysikalische Meßverfahren
Richtungsverlauf des Bohrens	Bohrlochlotung	–
Bestimmung des Grundwasserstands	Abloten des Wasserspiegels	–
Schichtgrenzen	Änderung der Bohrgeschwindigkeit, Untersuchungen an Bohrkernen und Spülproben	Messung der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit
Schichteinfallen	Untersuchung an Bohrkernen	–
Porosität, Permeabilität, Klüftung, Gesteinsdichte	Untersuchung an Bohrkernen und groben Bohrgutteilen	Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Wellen, radiometrische Messungen
Schichteninhalt	Untersuchung an Bohrkernen und groben Bohrgutteilen, reservoirmechanische Untersuchungen über Druckabfall und -aufbau, Schöpfproben (bei Wasser)	Messung der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit, Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Wellen, radiometrische Messungen
mechanische Gesteinseigenschaften	Untersuchung an Bohrkernen	–
geologische, paläontologische, stratigrafische Verhältnisse	Untersuchung an Bohrkernen und groben Bohrgutteilen	–
Beurteilung der Abbauwürdigkeit einer Lagerstätte	Untersuchung an Bohrkernen und groben Bohrgutteilen, Untersuchung des Druckabfalls und -aufbaus im Rahmen reservoirmechanischer Untersuchungen	–

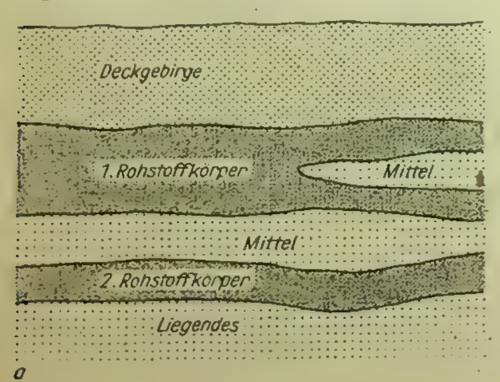
zeitig zur komplexen Auswertung und Interpretation herangezogen werden, mit um so größerer Wahrscheinlichkeit kann das Vorhandensein mineralischer Anreicherungen und weiterer interessanter Einzelheiten über Aufbau und Eigenschaften der Schichten auf indirekte Weise, d. h. ohne unmittelbare Untersuchung von festen, flüssigen und gasförmigen Proben, vorausgesagt werden.

1.1.4. Bergmännische Erkundungsarbeiten

Mit der weiteren Entwicklung geophysikalischer und bohrtechnischer Such- und Erkundungsmethoden verlieren bergmännische Erkundungsmethoden, die in der Regel kostenintensiver sind als die erstgenannten, an Bedeutung.
In bestimmten Fällen, z. B. in unwegsamem gebirgigem Gelände kann es jedoch auch heute noch zweckmäßig sein, ausstreichende Lagerstätten durch den Aushub von *Schürfgräben* zu verfolgen. Die Herstellung von *Schürfschächten* und *-stollen* sowie das Auffahren von Erkundungsstrecken kann zweckmäßig oder erforderlich werden, um z. B. die benötigten Mengen an Lagerstättensubstanz für Aufbereitungsversuche zu gewinnen oder um den Verlauf der kompliziert und unregelmäßig ausgebildeten Lagerstätten zu verfolgen. Dies ist vor allem bei oberflächennahen Lagerstätten sinnvoll.
Häufiger kommt es dagegen vor, daß im laufenden untertägigen Gewinnungsbetrieb bergmännische Erkundungsarbeiten in Form von *Erkundungsstrecken* und *-blindschächten* kombiniert werden mit unter Tage angesetzten Erkundungsbohrungen, die wiederum mit geophysikalischen Bohrlochmessungen gekoppelt werden. Die untertägige Erkundung spielt vor allem in sehr tiefliegenden Lagerstätten und bei Salzlagerstätten eine große Rolle. Bei letzteren soll nur mit einem Minimum an Erkundungsbohrungen die Lagerstätte von über Tage her erkundet werden, um möglichst wenig Verbindungen zwischen dem wasserführenden Deckgebirge und der wasserlöslichen Salzlagerstätte herzustellen.

1.2. Bergbau-Tagebau

Ein Tagebau ist ein Bergbaubetrieb, in dem die über dem festen mineralischen Rohstoff anstehenden Deckgebirgsschichten abgetragen werden und danach der so freigelegte Rohstoff zusammen mit Mitteln und dem notwendigen Nebengestein in einer offenen Baugrube gewonnen wird. Unter *Mitteln* werden dabei Schichten oder Einlagerungen, die zwischen oder in Rohstoffkörpern selbst liegen, verstanden. *Nebengestein* ist das einen Rohstoffkörper umgrenzende feste oder lockere Gestein, das die Nutzkomponenten des Rohstoffkörpers nicht oder nur unwesentlich führt (Abb. 1.2.0-1). Die Betriebsgröße eines Tagebaus wird durch den gewonnenen Massestrom an Rohstoff in Tonnen/Jahr (t/a) gekennzeichnet. Es gibt kleine Tagebaue mit einigen Tausend Tonnen Jahresförderung und wenigen Beschäftigten und Großtagebaue mit einer Rohstofförderung bis zu 44 Mio t/a und einigen Tausend Beschäftigten. Abgebaut werden im Tagebau vor allem Erze, Kohle, Ölschiefer, Sand, Kies, Ton, gebrochener Naturstein u. a. spezielle Rohstoffe aus oberflächennahen Lagerstätten. Der Anteil der Tagebauförderung gegenüber dem Untertageabbau wächst z. Z. noch ständig, weil in Tagebauen eine wesentlich höhere Arbeitsproduktivität und geringere Selbstkosten je Tonne Rohstoff erreicht werden können. Im Weltmaßstab beträgt bei Nichterzen der Anteil der Tagebau- an der Gesamtförderung ≈ 95 %, bei Erzen 70 %, bei Steinkohle 30 % und bei Braunkohle fast 100 %. Die größten Tagebaue gibt es z. Z. bei der Gewinnung von Eisen- und Kupfererz sowie von Braunkohle. Gleiche Lagerstättenverhältnisse vorausgesetzt, arbeitet ein großer Tagebau immer wirtschaftlicher als ein kleiner. Jedoch sind bei der Gewinnung von Massenrohstoffen



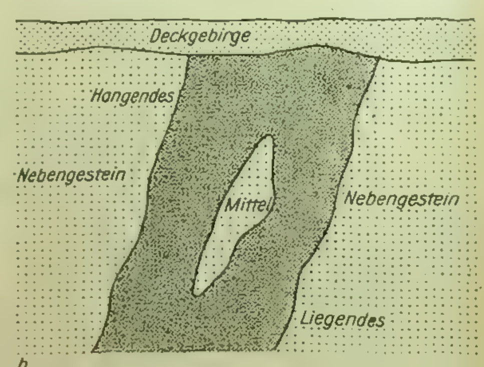


Abb. 1.2.0-1 Lagerstättentypen: a Schichtlagerstätte, b steilstehende Lagerstätte

z. B. für die Baumaterialienindustrie kleine und mittlere Betriebe in Verbrauchernähe von der Summe der Gewinnungs- und Transportkosten her wirtschaftlicher als Großtagebaue in größerer Entfernung.
Ausgehend von den Lagerstättenverhältnissen wird die Abbaumöglichkeit im Tagebau u. a. bestimmt durch das *geologische Mächtigkeitsverhältnis* Deckgebirge zu Rohstoff $D:R$, und die absolute Tiefe. Gegenwärtig sind bei Erztagebauen Tiefen bis 350 m erreicht und solche bis 500 m vorgesehen. Bei steilstehenden Lagerstätten nennt man die Grenze zwischen Tagebau und Untertageabbau die *ökonomische Grenzteufe* (vgl. Abb. 1.2.2-4).
Tagebaue beeinflussen erheblich die Siedlungsstruktur und die Landschaft. Ersteres erfolgt durch das Heranziehen von Arbeitskräften und die damit verbundenen sozialen Maßnahmen sowie durch das Verlegen von Straßen, Flüssen, Seen, Ortschaften und Energietrassen. Die Landschaft wird verändert durch Entzug und Rückgabe von Flächen für die Land- und Forstwirtschaft, durch Maßnahmen der Entwässerung und der Schaffung von Wasserspeichern sowie durch eventuell für die Verkippung des Abraumes zu errichtende Halden. Die Tendenz geht dahin, durch Wiederurbarmachung, Rekultivierung und Restlochgestaltung die Landschaft positiv zu verändern. Dabei sind schon wesentliche Erfolge erreicht worden.

1.2.1. Entwässerung und Aufschluß

Entwässerung. In erster Linie bestimmt die Höhe des Grundwasserspiegels in der Lagerstätte die Gestaltung eines Tagebaus. Entweder wird der Grundwasserspiegel mit Hilfe von Baggern freigelegt und der Rohstoff unter Wasser mit schwimmenden Geräten abgebaut (sog. *Naßgewinnung*), oder Deckgebirge und Rohstoff werden entwässert. Unter Entwässerung versteht man im Bergbau das Freihalten der Grubenräume von Wasser, das die Gewinnungs- und Transportvorgänge erschwert, die Standsicherheit der Böschungen beeinträchtigt und die Belastbarkeit der Arbeitsebenen herabsetzt. Da es sich z. T. um erhebliche Wassermengen handelt, die vor und mit dem Abbau nach Übertage gehoben werden müssen, hat die Entwässerung einen Einfluß auf die Sicherheit des Abbaus und die Ökonomie. In den Braunkohletagebauen der DDR müssen im Durchschnitt bei der Förderung von einer Tonne Rohkohle 5 m^3 Wasser gehoben und abgeleitet werden. Einzelne Tagebaue im Lausitzer Urstromtal müssen sogar 15 m^3 Wasser heben, was einem Volumenstrom von 4,5 m^3/s entspricht.
Die Entwässerung des Deckgebirges mit Schächten, Strecken, Fall- und Steckfiltern ist heute von untergeordneter Bedeutung. Angewendet wird die häufig großflächige Entwässerung mit Filterbrunnen und die Abriegelung von Wasserzuflüssen durch Dichtungswände. *Filterbrunnen* bestehen aus meist mit Saugspülbohrgeräten hergestellten Bohrlöchern, aus eingehängten Filterrohren, aus einer nach der Korngröße abgestuften Kiesschüttung und einer Unterwasser-Motorpumpe mit den entsprechenden Rohrleitungen sowie Steuereinrichtungen. Das Wasser wird nach Übertage gepumpt und in Sammelleitungen oder Gräben eingeleitet (Abb. 1.2.1-1). Um den Filterbrunnen herum entsteht ein Absenkungstrichter, der eine bestimmte Reichweite hat. Durch die geeignete Anordnung von Filterbrunnen kann einmal eine großflächige Absenkung des Grundwasserspiegels oder durch Brunnenriegel eine Verhinderung des Wasserzuflusses in den offenen Tagebauraum erreicht werden.
Dichtungswände werden unterirdisch zum Abriegeln und Anstauen von Wasser angelegt. Nach dem Herstellen eines Schlitzes von der Erdoberfläche aus wird dieser mit einer Mischung aus Wasser, Ton, Zement, Chemikalien und Sand nach bestimmten Rezepturen verfüllt. Dabei muß die entstehende *Dichtungswand* gut in eine wasserstauende Schicht eingebunden sein, wobei beide eine bestimmte Mindestdicke haben müssen. Schon scheinbar kleine Undichtigkeiten machen die Dichtungswand weitgehend unwirk-

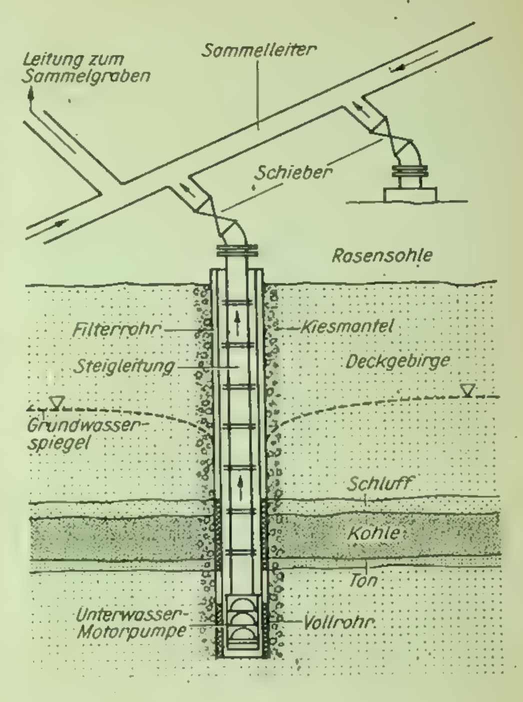


Abb. 1.2.1-1 Filterbrunnenentwässerung

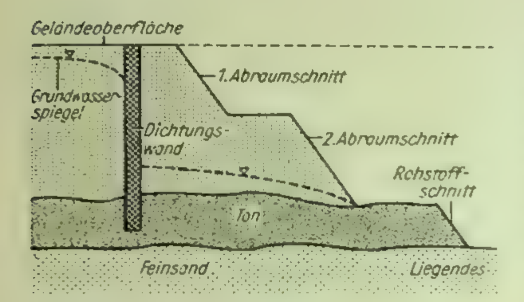


Abb. 1.2.1-2 Dichtungswand

sam (Abb. 1.2.1-2). Muß das Deckgebirge entwässert werden, so ist damit schon vor dem eigentlichen Aufschluß zu beginnen. Während des Betriebes erfolgt ein Abpumpen des zufließenden Grund- und Niederschlagswassers.

Aufschluß. Zum Tagebauaufschluß gehören alle vorbereitenden Arbeiten zur Gewinnung von Rohstoffen im Tagebau und die Herstellung des im Projekt ausgewiesenen Aufschlußraums. Solche Arbeiten sind z. B. Grunderwerb, Freimachen der Geländeoberfläche, Entwässerung, Beschaffen der Ausrüstungen, Einrichten der Böschungen und Arbeitsebenen, Anlage von Außenkippen, Bau von Lagern, Transporteinrichtungen, Werkstätten, Sozialeinrichtungen u. a. Der Aufschlußraum wird so hergestellt, daß von ihm aus die Gewinnung des Rohstoffs in der vorgesehenen Qualität und Menge pro Jahr beginnen kann.

Die *Aufschlußart* richtet sich nach dem Typ der Lagerstätte. Bei Lagerstätten in den Bergen oder am Hang spricht man von einem *Hangaufschluß*, bei Lagerstätten unterhalb eines geographischen Plateaus von einem *Plateauaufschluß*. Die Form des zu schaffenden Aufschlußraums kann ebenfalls in Abhängigkeit von der Rohstoffart, dem Lagerstättentyp, der eingesetzten Ausrüstung, der Abbauplanung usw. sehr verschieden sein. Prinzipiell gibt es Aufschlußgraben, -birne, -grube, -trichter, -anschnitt und einen Einschnitt mit Aufweitung. Der Aufschluß eines großen Tagebaus erfordert sehr hohe Investitionen. Bei einer Rohstofförderung von 20 Mio t/a betragen die Aufschlußkosten mehr als eine Milliarde Mark. Von daher wird verständlich, daß die Investitionsvorbereitung in Form einer wissenschaftlich fundierten Projektierung sehr sorgfältig vorgenommen werden muß. Ferner ist die Aufschlußzeit möglichst gering zu halten, damit die Investitionskosten in kurzer Zeit amortisiert werden können.

1.2.2. Abbauplanung

Man versteht darunter die Ermittlung und Fixierung der räumlich-zeitlichen Phasen eines Tagebaus vom Aufschluß über den Regelbetrieb, die Auslaufphase bis hin zur Restlochgestaltung in Form von Rissen, Berechnungen, Tabellen und verbalen Beschreibungen. Die Abbauplanung dient der überprüfbar sicheren Gestaltung eines Tagebaus, der Bedarfsdeckung nach Menge und Qualität, dem Nachweis von Terminen für Dritte, dem Ausweisen von erforderli-

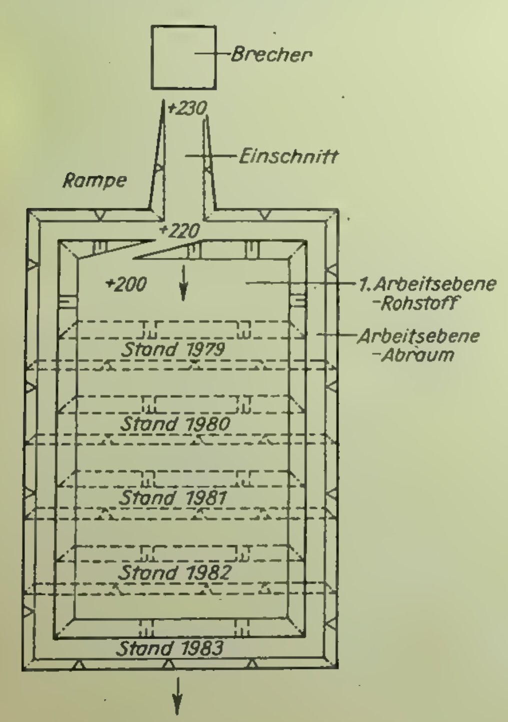


Abb. 1.2.2-1 Parallelabbau

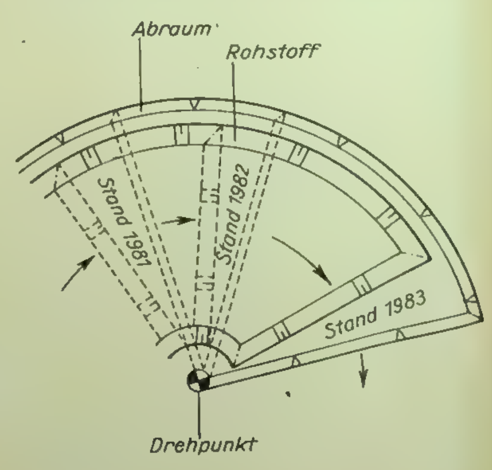


Abb. 1.2.2-2 Schwenkabbau

chen Investitionen, Ausrüstungen, Baukapazitäten, Energie, Wasser, Arbeitskräften und einer langfristigen Berücksichtigung der Erfordernisse von Landeskultur und Umweltschutz usw. Die Abbauplanung ist kurzfristig Gegenstand der Wochen- und Monatstechnologie, mittelfristig Gegenstand der Projektierung und langfristig Gegenstand von Abbaustudien. Dabei sollte jede Lagerstätte vor Beginn des Abbaus für den gesamten Abbauzeitraum studienhaft untersucht werden, um die Gesamtkosten zu minimieren. Zur Abbauplanung gehört die Kenntnis der Flächen- und Raumelemente sowie der Ausrüstungselemente eines Tagebaus (vgl. 1.2.3.). Ferner sind die schon erwähnten Aufschlußarten und -formen sowie die Abbauarten Elemente der Abbauplanung.

Abbauarten. Charakteristisch für den *Parallelabbau* (Abb. 1.2.2-1) sind die parallel fortschreitenden Abbauböschungen und Arbeitsebenen im Abraum und im Rohstoff. Dabei entfernen sich die Abbaufronten von einem Fixpunkt, z. B. einem Brecher oder einer Ausfahrt, ständig. Ein Aufschwenken um einen festen Drehpunkt ist für

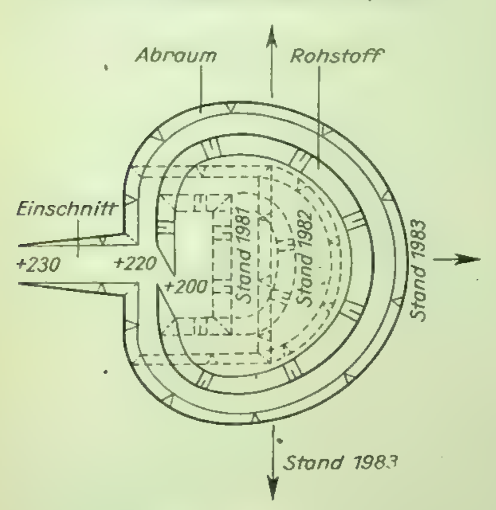


Abb. 1.2.2-3 *Weitungsabbau*

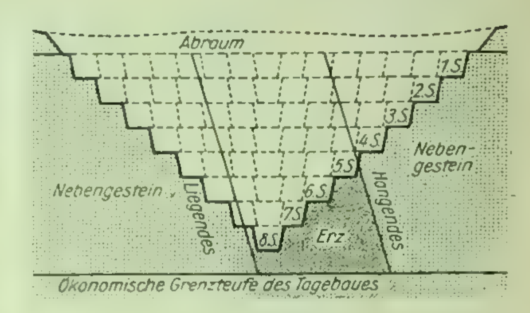


Abb. 1.2.2-4 *Abbau nach der Tiefe*

einen größeren Zeitabschnitt beim *Schwenkabbau* (Abb. 1.2.2-2) möglich. Im Festgestein wird oft, ausgehend von einem Einschnitt mit Aufweitung als Aufschlußform, ein *Weitungsabbau* (Abb. 1.2.2-3) betrieben. Er hat den Vorteil, daß bei den entstehenden langen Abbaufronten aus verschiedenen Lagerstättenteilen Rohstoffe unterschiedlicher Qualität gemischt werden können. Eine völlig andere Abbauart ist für steilstehende Lagerstätten der *Abbau nach der Tiefe*. Die bevorzugte Abbaurichtung ist hier die vertikale. Die Ausdehnung in horizontaler Richtung ergibt sich durch die erforderlichen Böschungssysteme (Abb. 1.2.2.2-4, vgl. 1.2.3.). Die Abbauplanung spielt für Tagebaue eine um so größere Rolle, je höher die Jahresförderung, je größer die Sicherheitsanforderung, je höher die Qualitätsforderung, je komplizierter die Lagerstätte und je wertvoller der Rohstoff ist.

1.2.3. Tagebauelemente

Zu den Flächen- und Raumelementen gehören vor allem die Böschung, die Trennebene, das Böschungssystem, die Arbeitsebene, das Freie Liegende, die Rampe, der Einschnitt u. a. (Abb. 1.2.3-1). *Böschungen* sind geneigte Flächen, die bei der Gewinnung und Verkippung

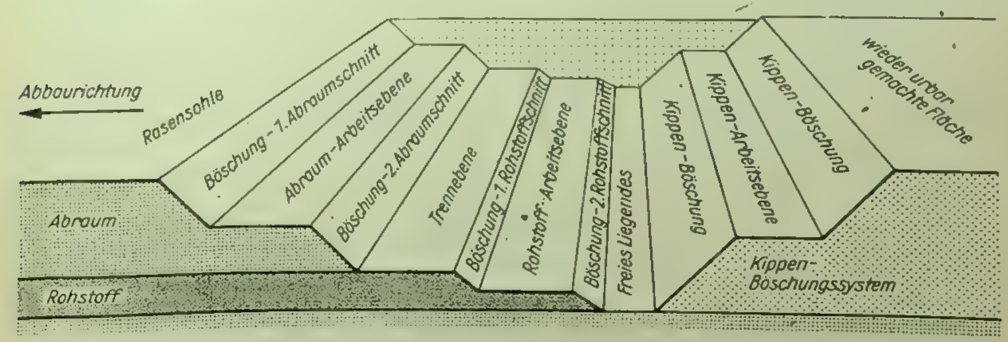


Abb. 1.2.3-1 *Flächen- und Raumelemente im Tagebau*

entstehen. Jede horizontale oder schwachgeneigte Ebene zwischen 2 durch den Bergbau entstandenen Böschungen heißt *Trennebene*. Werden auf ihr Bagger oder Transportmittel betrieben, so spricht man von einer *Arbeitsebene*. Ein aus 2 oder mehreren übereinanderliegenden Böschungen gebildetes System mit den dazugehörigen Trennebenen ist ein *Böschungssystem*. Die unter dem untersten Rohstoffkörper bei der Gewinnung entstehende Fläche nennt man das *Freie Liegende*. Auf das Liegende wird im Falle einer Innenverkippung der Abraum verkippt und so die devastierte (zerstörte) Bodenfläche wieder urbar gemacht.
Eine *Rampe* dient der Transportverbindung zwischen 2 Arbeitsebenen. Sie ist als schiefe Ebene in einer Böschung angelegt. Ein *Einschnitt* ist eine schiefe Ebene von einer höheren zu einer tiefer gelegenen Arbeitsebene. Er wird von 2 Böschungsunterkanten begrenzt (vgl. Abb. 1.2.2-1).
In Abhängigkeit von der Rohstoffart und dem Lagerstättentyp können in Tagebauen die verschiedensten Ausrüstungselemente eingesetzt werden. Für die Rohstoffgewinnung und Abraumbewegung sind durch jedes Abbausystem 4 Teilfunktionen zu realisieren: Lösen, Laden, Transportieren und Abgeben des Gesteins bzw. Rohstoffs. Zusätzlich können in bestimmten Abbausystemen noch das Zerkleinern und das Speichern in Frage kommen. Unter *Abbausystem* wird dabei die Gerätekette zur Erfüllung der genannten Teilfunktionen verstanden. Bei der Projektierung kommt es darauf an, unter Beachtung der Lagerstättenvoraussetzungen und aller Nebenbedingungen das jeweils optimale Abbausystem auszuwählen. In Tab. 1.2.3-2 sind nahezu alle möglichen Ausrüstungselemente für Tagebaue nach der Erfüllung der Teilfunktionen zusammengefaßt. Dabei gibt es sowohl Geräte, die nur eine Teilfunktion erfüllen, als auch solche, die alle 4 realisieren können. Entsprechend kann eine Einteilung der Abbausysteme erfolgen.
Spezielle Ausrüstungen für das *Lösen* aus dem Gebirgsverband sind nur im Festgestein erforderlich. Dafür kommt in erster Linie das Bohren und Sprengen in Frage. In Tagebauen werden fast ausnahmslos Großbohrlochsprengungen durchgeführt. Die Bohrlöcher von 70 bis 480 mm Durchmesser werden durch schwere selbstfahrende Bohrwagen (vgl. Abb. 1.3.4-2) entweder drehend bei weicheren Gesteinen oder schlagend hergestellt. Das Sprengen erfolgt mit losen oder patronierten Sprengstoffen verschiedenster Art (vgl. 1.3.4.). Eine besondere Rolle spielt in Tagebauen das richtige Zündverfahren. Außer mit Bohren und Sprengen kann ein Lösen von Gestein aus dem Gebirgsverband noch mit Hilfe von Aufreißern erfolgen. Eine Planierraupe zieht dabei einen schweren Reißzahn hinter sich her, der entlang von Klüften und Spalten in das Gebirge eindringt und Gesteine bestimmter Festigkeit in einer Tiefe bis zu ≈ 1,0 m zerstört. Alle übrigen Gesteine werden direkt durch Bag-

Tab. 1.2.3-2 *Auswahl von Ausrüstungselementen von Tagebauen*

Gewinnungselemente		Förderelemente	Verkippungs- bzw. Einbauelemente	Speicherelemente	Zerkleinerungselemente
Lösen	Laden*	Transportieren	Abgeben		
Bohren und	Planierraupe	Seilbahn	Bandabwurfgerät	Bunker	Spaltgeräte
Sprengen	Planierradschlepper	Kabelkräne	Absetzer	Trichter	Fallbirne
Aufreißen	Motorgrader (Erdhobel)	Derricks	Bandwagen	Gräben	thermische Geräte
	Pflugbagger	Rutschen	Kipper	Silos	elektrische Geräte
	Schurfkübelraupe	Schwingrinnen	Pflug	Schüttkegel	Bohren und Sprengen
	Anhängescraper	Schubroste	Kippstelle	Halden	Brecher
	(Schürfkübelanhänger)	Rohrleitungen	Spülstelle	Kippen	
	Motorscraper	Züge	Kratzer		
	(Motorschürfwagen)	LKW	Löffelbagger		
	Schrapper	Bandanlagen	Planierraupe		
	Löffelbagger	Gefäßbandanlagen	(Verdichtungs-		
	Schürfkübelbagger	Schwimmgefäße	geräte)		
	Greiferbagger				
	Lader				
	Eimerkettenbagger				
	Schaufelradbagger				
	Joy-Lader				
	Gewinnungsbohrgeräte				
	Hydromonitoren				
	Luft-Misch-Heber				
	Saugbagger				
	Schwimmgreiferbagger				
	Baggerschiffe				

* Bei Erfüllung der Teilfunktionen Lösen und Laden in einem Gerät sind diese unter Laden aufgeführt

Tab. 1.2.4-1 *Wichtigste braunkohlenfördernde Länder (1975)*

Land	Förderung Mio t/a	% der Weltförderung
DDR	246,7	28,7
UdSSR	160,2	18,6
BRD	123,4	15,5
ČSSR	86,3	10,0
VR Polen	39,9	4,6
SFR Jugoslawien	34,9	4,0
Australien (1971)	28,2	3,3
VR Bulgarien	27,5	3,2
Ungarische VR	21,9	2,5
Welt insgesamt	≈ 862	

ger gelöst. Dafür kommen als Leistungsgeräte Eimerketten- und Schaufelradbagger sowie Löffel- und Flachbagger in Frage (vgl. 10.5.1.).
Als Fördermittel für den Transport im Bergbau werden vor allem Züge, Schwerlastwagen, Gurtbandförderer und Rohrleitungen eingesetzt. Seilbahnen, Kabelkräne u. a. spezielle Förderausrüstungen werden heute nur noch selten eingesetzt. Dabei gibt es in den Tagebauen einen deutlichen Trend zur gleislosen Förderung mit LKW und – vor allem bei großen Massen und Steigungen – zur Gurtbandförderung. Im Festgestein, wo großstückiges Haufwerk nach dem Sprengen nicht unmittelbar auf Gurtbandförderer aufgegeben werden kann, setzt man fahrbare Brecheranlagen als Zwischenglied ein.
Als Elemente für das Verkippen von Abraum werden Absetzer bei Zugförderung und Bandabwurfgeräte bei Gurtbandförderung eingesetzt (Tafel 2). In Festgesteinstagebauen können auch große Löffelbagger für das Absetzen von Abraum auf der Kippe verwendet werden.

1.2.4. Tagebauprozesse

Die Gestaltung des Tagebauprozesses bestimmen vor allem die Art des Rohstoffs und seine Verwendung, die Lagerstätte, die Jahresfördermenge, die klimatischen Bedingungen, die territorialen Bedingungen u. a.

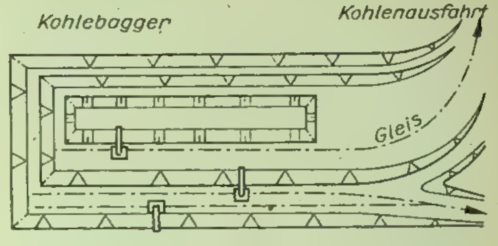


Abb. 1.2.4-3 Grabenaufschluß

Braunkohlentagebau. Rohbraunkohle wird in einer geringer werdenden Zahl von immer größeren Tagebauen aus zunehmender Teufe gewonnen. Sie ist in der DDR auf lange Sicht der wichtigste Primärenergieträger und wird in Kraftwerken, Brikettfabriken, Kokereien usw. mit einer Jahresfördermenge von 250 bis 270 Mio. t eingesetzt. Weitere Förderländer vgl. Tab. 1.2.4-1.
Braunkohlenlagerstätten gehören zu den Schichtlagerstätten (vgl. Abb. 1.2.0-1). Das Deckgebirge besteht überwiegend aus Lockergestein, wie Sand, Kies, Geröll, Geschiebemergel, Ton, Schluff. Es ist besonders in den Urstromtälern stark wasserführend. Festgesteinseinlagerungen sind in Form von eiszeitlichen Blöcken oder von Kalkkonkretionen selten anzutreffen. Wo sie auftreten, behindern sie den Abbau beträchtlich. Die Mächtigkeit des Deckgebirges nimmt für künftige Tagebaue ständig zu, überschreitet aber in der Regel 100 m nicht.
Die Anzahl der Flöze und ihre Mächtigkeit sind in den einzelnen Lagerstätten unterschiedlich. So tritt im Geiseltal und im Bitterfelder Raum jeweils nur ein Flöz auf, während in den Gebieten von Borna, Halle und in der Niederlausitz 2 bis 4 Flöze vorkommen. Die Flözmächtigkeit beträgt z. B. beim Niederlausitzer Unterflöz 8 bis 14 m, in Bitterfeld bis 20 m und im Geiseltal bis 100 m. Die Mittel zwischen 2 Flözen oder im

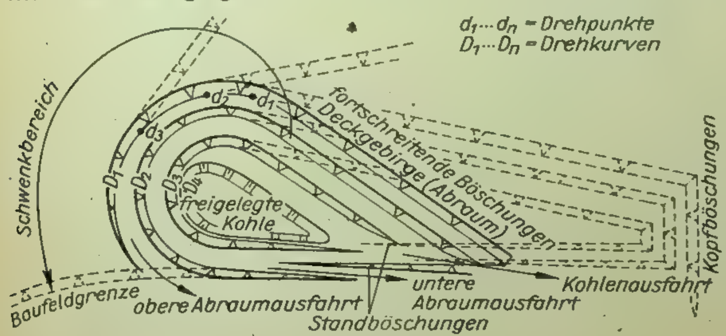


Abb. 1.2.4-2 Birnenaufschluß

Flöz selbst (vgl. Abb. 1.2.0-1) bestehen aus Sand, Kies, Schluff oder Ton. Nur selten haben sich durch SiO_2 verkittete Quarzite herausgebildet. Nach dem geologischen Alter unterscheidet man eozäne, oligozäne und miozäne Braunkohlenablagerungen.

Entwässerung und Aufschluß wurden schon allgemein unter 1.2.1. beschrieben. Außer der Filterbrunnenentwässerung und der Abriegelung durch Dichtungswände ist bei den flächenmäßig ausgedehnten Braunkohlentagebauen noch die Oberflächenentwässerung zur Sammlung und Ableitung von Niederschlagswasser sowie die Entwässerung der Kippen mittels Dränage von Bedeutung.

Eine der für den Aufschluß von Braunkohlentagebauen anzutreffenden Formen ist der *Birnenaufschluß* (Abb. 1.2.4-2), der besonders für Tagebaue mit Zugförderung angewendet wird. Teilweise erfolgt auch bei Tagebauen, in denen der Einsatz einer Abraumförderbrücke vorgesehen ist, der Aufschluß zunächst mit Zugförderung im Birnenaufschluß. Beim Einsatz von Gurtbandförderern und teilweise auch von Abraumförderbrücken erfolgt dagegen ein *Grabenaufschluß* (Abb. 1.2.4-3). Aufgabe der Aufschlußarbeiten ist die Vorbereitung des Rohstoffabbaus für den vorgesehenen Massestrom pro Jahr einschließlich der Herstellung des im Projekt vorgesehenen Aufschlußraumes. Der Umfang der Aufschlußarbeiten hängt wesentlich von dem geologischen Mächtigkeitsverhältnis Deckgebirge zu Rohstoff ab ($h_D : h_R$ in m : m). Bei einem Wert für 1975 von im Durchschnitt 4:1 waren beim Abbau von 10 m Kohle 40 m Abraum abzutragen. Bis 1990 wird dieses Verhältnis auf über 5:1 anwachsen. Auf die Lage der Aufschlußstelle im Abbaufeld und die Abbauplanung wirken eine Vielzahl von Faktoren ein. Sie sind vor allem durch die Lagerstätte selbst, den Bedarf sowie territoriale, ökonomische, technische Nebenbedingungen u. a. bedingt.

Gewinnung von Abraum und Kohle erfolgt durch Eimerketten-, Schaufelrad- und Löffelbagger. Ein mögliches Geräteeinsatzschema und das zugehörige Böschungssystem der Gewinnungsseite eines Braunkohlentagebaues zeigt Abb. 1.2.4-4. Mit einer zunehmenden Zahl von Strossen wachsen die Abbaukosten. Deshalb werden auch in Abhängigkeit von den geologischen Bedingungen immer größerer Bagger eingesetzt. Die Abbaurichtung verläuft in der Abb. in der Längsrichtung des Schnitts, die Strossen verlaufen senkrecht dazu.

Verhiebsarten. - Unter Verhieb als bergmännischem Ausdruck versteht man den Abbaufortschritt im Abraum-, Rohstoff- oder Nebengesteinskörper einer Lagerstätte, der durch die Arbeitsweise eines Baggers oder des Bohr- und Sprengregimes bedingt ist. Die Verhiebsart hängt im wesentlichen von der Art des Baggers bzw. vom Fahrwerk ab. Eimerkettenbagger auf Schienenfahrwerken arbeiten im Frontverhieb, d. h. an langer Front hin und her fahrend (Abb. 1.2.4-5). Schaufelrad- und Löffelbagger mit

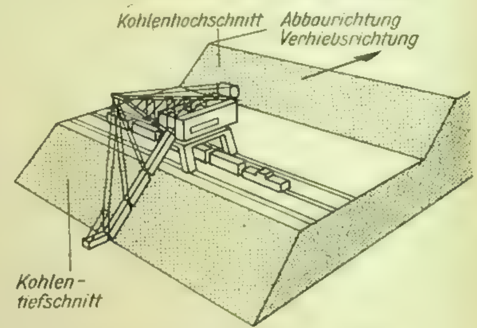


Abb. 1.2.4-5 Eimerkettenbagger im Frontverhieb des Kohlentiefschnitts

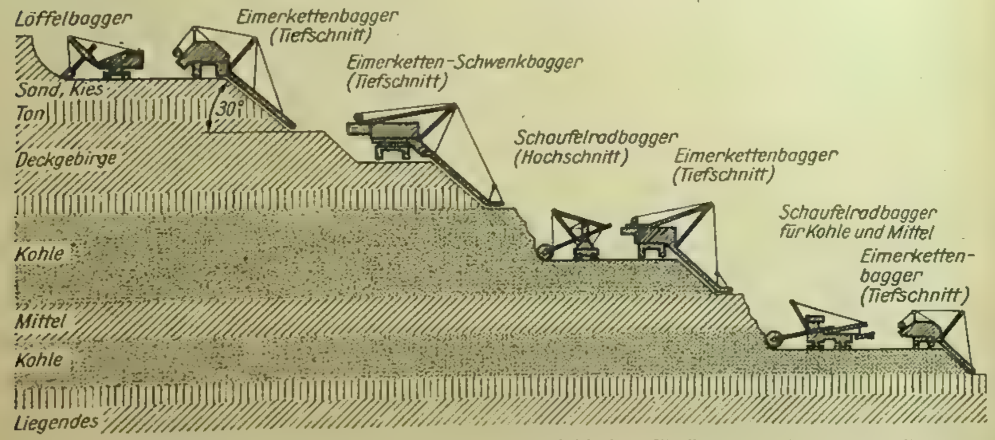


Abb. 1.2.4-4 Braunkohlentagebau mit den Einsatzmöglichkeiten für Bagger (Längen gegenüber Höhen verkürzt)

Raupenfahrwerken arbeiten im Kopf- oder Seitenblockverhieb (Abb. 1.2.4-6). Beim Kopfblockverhieb steht der Bagger in Fahrtrichtung vor dem abzubauenden Block.

Förderung von Abraum und Kohle. Von der Baggerseite wird der Abraum entweder im Direkttransport über den offenen Tagebau hinweg zur Kippe gefördert, wie z. B. bei Abraumförderbrücken und bei der Kombination Bagger-Absetzer, oder es erfolgt ein Strossentransport um den offenen Tagebauraum herum, wie z. B. bei Zug- oder Bandförderung. Abraumförderbrücken sind die mit Abstand wirtschaftlichste Förderart für Abraum (Abb. 1.2.4-7). Sie sind jedoch nur bei relativ regelmäßigen Ablagerungsformen und bei vorwiegend rolligen Bodenarten anwendbar. Mit modernen Förderbrücken können Abtragsmächtigkeiten von 34 bis 60 m beherrscht und Volumenströme bis 100 Mio m^3/a gefördert werden. Die Arbeitsproduktivität ist im Vergleich zu anderen Förderarten außerordentlich hoch. Zug- und Bandförderung werden in Anpassung an entsprechende Lagerstättenverhältnisse eingesetzt. Es sind Elektrolokomotiven mit einer Dienstmasse bis 150 t und Wagen mit Inhalten bis 40 m^3 im Abraum und 84 m^3 in der Kohle im Einsatz. Bei der Bandförderung sind im Tagebau im Durchschnitt 20 bis 30 km Gurtbandförderer verlegt. Bei Gurtgeschwindigkeiten bis 11 m/s und Gurtbreiten bis 2,5 m werden Volumenströme bis zu 15000 m^3/h erreicht. Das Rücken von Fahrgleisen und Bandanlagen erfolgt in Abbaurichtung mit Rückmaschinen oder schweren Bulldozern. Abb. 1.2.4-8 zeigt, wie ein Gleis mit einer Gleisrückmaschine angehoben, seitlich ausgeschwenkt und beim Fahren der Maschine um das eingestellte Maß gerückt wird. Nach einem Ausrichten und Unterstopfen der Schwellen kann das gerückte Gleis wieder befahren werden.

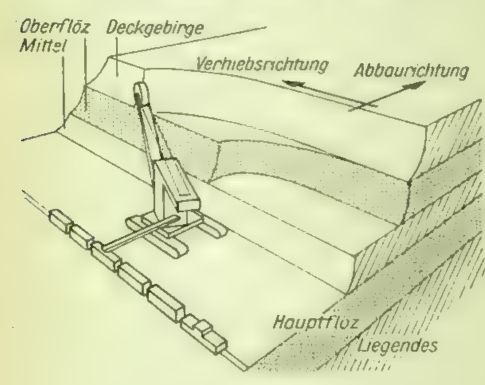


Abb. 1.2.4-6 Schaufelradbagger im Seitenblockverhieb von Deckgebirge, Kohle und Mittel

Verkippen des Abraums. Unter Verkippen versteht man allgemein das Ablagern von Abraum o. a. Schüttgütern. Eine *Kippe* ist ein Teil des

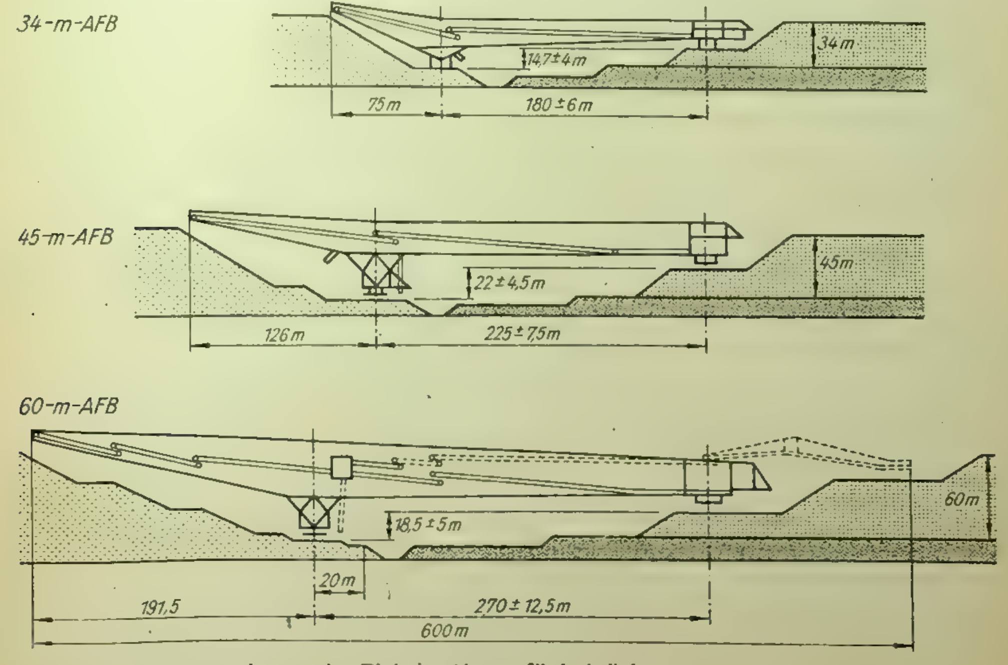


Abb. 1.2.4-7 Einsatzschemen der Einheits-Abraumförderbrücken

verkippten Raumes eines Tagebaus; sie wird von einer Arbeitsebene aus in Tief- oder Hochschüttung hergestellt. Eine *Halde* ist eine auf unverritztem oder auf wieder urbar gemachtem Gelände angelegte Kippe. Die Aufschlußmassen müssen zunächst auf einer Außenkippe, außerhalb des Tagebauraumes, verstürzt werden. Nach Erreichen der kritischen Tagebaustellung kann die Innenverkippung innerhalb des Tagebauraumes aufgenommen werden. Die Innenverkippung ist durch die kürzeren Förderwege kostengünstiger. Bei der Verkippung wird angestrebt, die ursprünglichen Vorflutverhältnisse wieder herzustellen. Als Verkippungsgeräte kommen Absetzer und Bandabwurfgeräte in Betracht (Tafel 2). Über die Bandausleger dieser Geräte mit Längen von 60 bis 150 m wird der Abraum im Tagebauraum verstürzt. Der Baggerseite entsprechend werden dabei Volumenströme bis 15 000 m^3/h erreicht. Die Verkippung von Abraum kann auch mit Hilfe von Kippenpflügen oder auf Spülkippen erfolgen. Jedoch wird diese Technik heute weniger angewendet.

Kiessandtagebau. Kies und Sand werden im Bauwesen sowie in der Glas-, keramischen, chemischen und metallurgischen Industrie in großen Mengen eingesetzt. Abgebaut werden dabei Rohkies und -sand, die im Zusammenhang mit der Eiszeit, mit Urstromtälern oder mit rezenten Flüssen vom Tertiär bis in die heutige Zeit abgelagert wurden. In allen Fällen, bei denen eine größere Wasserüberdeckung durch Flüsse, Seen und das Meer vorliegt oder der Grundwasserspiegel bis in die Nähe der Erdoberfläche ansteht – bei denen also eine Entwässerung und Trockenlegung der Lagerstätte zu hohe Kosten bereiten würde –, wird naß unter Wasser abgebaut. Die Aufschlußarbeiten dafür sind relativ einfach und kostengünstig durchführbar. Die Gewinnung selbst erfolgt mit Schwimmgreiferbaggern, schwimmenden Lufthebern oder Saugbaggern. In der DDR sind überwiegend Schwimmgreiferbagger eingesetzt, von denen aus der Rohkiessand mit schwimmenden Gurtbandförderern an Land oder zur Aufbereitung transportiert wird (Tafel 1). Von der Aufbereitung aus werden der klassierte Kies und Sand (vgl. 1.6.4.) über die Wasserstraßen, Schienenwege oder durch den Kraftverkehr zu den Verbrauchern transportiert. Die Verteilung der Fertigprodukte spielt für die Frage des Abbaus eine wesentliche Rolle.

Eine Trockengewinnung oberhalb des Grundwasserspiegels wird je nach der Jahresfördermenge mit kleinen Löffelbaggern oder Ladern und einem Abtransport des Rohkiessandes mit LKW zur Aufbereitung bei kleinen Tagebauen bzw. mit Eimerketten- oder Schaufelradbaggern und Gurtbandförderung bei großen Tagebauen mit bis zu 3 Mio t Jahresförderung durchgeführt.

Tontagebau. Der Abbau von Ton erfolgt für die Grob- und Feinkeramik, die Feuerfestindustrie, die Aluminium- und Zementindustrie in unterschiedlichen Qualitäten. Tone sind in den Lagerstätten in verschiedenen Varietäten anzutreffen und z. T. stark mit Sandmitteln durchsetzt. Sie sind flözartig oder auch kesselförmig abgelagert, in flachen Schichtenfolgen oder auch geneigt. Sie sind von mulmiger, plastischer oder auch stark verfestigter Konsistenz. Zu den tonartigen Rohstoffen sollen in diesem Abschnitt auch Kaolin, Mergel und Kreide gezählt werden. Der Abbau von Tonen schafft die schwierigsten Bedingungen im Vergleich zu den anderen Lockergesteinen. Böschungen müssen z. T. sehr flach gestaltet werden, besonders dann, wenn im Gebirge vorgegebene Gleitflächen vorhanden sind. Tone lassen sich bei ihrer Feinkörnigkeit kaum entwässern. Das Wasser ist aber ein weiterer Faktor, der die Böschungsstabilität beeinflußt. Die Stabilität der Arbeitsebenen ist ebenfalls in Abhängigkeit von der Wasseraufnahme wechselhaft. Das spielt für den sicheren Einsatz der Geräte und Ausrüstungen auf den Arbeitsebenen eine Rolle. Und schließlich neigen die

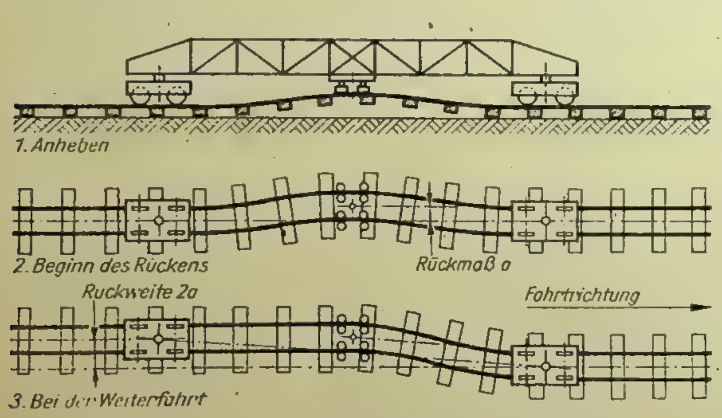


Abb. 1.2.4-8 Arbeitsweise einer Brückengleisrückmaschine

Tone zum Anhaften in Fördergefäßen, Baggereimern, an Gleisen, Bandanlagen, in Schurren, Bunkern usw.
Kleine Tontagebaue für die Ziegelindustrie mit 30000 bis 50000 t Jahresförderung sind fast ausschließlich mit kleinen Eimerkettenbaggern ausgerüstet, um schon bei der Gewinnung eine gute Mischung des Rohtons zu erreichen. Die Abförderung erfolgt mit Zügen oder LKW. Große Tontagebaue mit 1,5 bis 2 Mio t Rohton pro Jahr sind vor allem mit Schaufelradbaggern für eine selektive Gewinnung und Gurtbandförderung ausgerüstet. Daneben werden auch Löffel- und Flachbagger für die Gewinnung eingesetzt.
Natursteintagebau. Dazu zählt der Abbau von Karbonat- und Sulfatgesteinen, wie Kalkstein (Tafel 20), Gips und Anhydrit, für die Zement-, Kalk-, Gips-, metallurgische und chemische Industrie. Weiter gehört dazu die Gewinnung von gebrochenem Naturstein für die Schotter- und Splittherstellung, vor allem von Quarzporphyr, Grauwacke und Phonolith, sowie die Gewinnung von großen Blöcken für die Werksteinindustrie. Dafür kommen vor allem Granite, Marmor, Schiefer, Travertin und Sandstein in Frage. Die Abbauprozesse sind so unterschiedlich, wie die Rohstoffe, die Lagerungsbedingungen, die Nebenbedingungen des Abbaus und die Forderungen der Verbraucher es vorgeben.
Mit Ausnahme der Großblockgewinnung sind allen Tagebauen die Prozeßabschnitte *Abraumbeseitigung*, *Lösen* des Rohstoffs aus dem Gebirgsverband, *Laden* des gelösten Haufwerks, *Haufwerktransport* und *Vorbrechen* des großstückigen Haufwerks gemeinsam. In den großen Kalksteintagebauen der Zementindustrie mit 4 bis 6 Mio t Jahresförderung erfolgt das Lösen durch Bohr- und Sprengarbeit. Mit Großbohrlochsprengungen werden pro Abschlag 50000 bis 150000 t gelöst. Von der Stückigkeit des Haufwerks hängt der weitere Prozeß wesentlich ab, deshalb wird auf die Optimierung der Bohr- und Sprengarbeit großer Wert gelegt. Neben der Bohr- und Sprengarbeit ist für das Lösen die Anwendung schwerer Bulldozer mit Heckaufreißer in bestimmten Fällen möglich. Das Laden des Haufwerks erfolgt mit Löffelbaggern. Beladen wird der Aufnahmetrichter einer fahrbaren Brecheranlage, in der das Haufwerk von max. 1 m Kantenlänge auf Stückgrößen < 400 bis 200 mm gebrochen wird. Die weitere Abförderung zur Nachaufbereitung bzw. zum Zementwerk wird mit Gurtbandförderern durchgeführt (Tafel 1).
In den großen Festgesteinstagebauen der Schotter- und Splittindustrie erfolgt das Lösen aus dem Gebirgsverband ausschließlich durch Bohr- und Sprengarbeit, wobei sich allerdings das Bohren und Sprengen von dem bei der Kalksteingewinnung aufgrund der wesentlich höheren Festigkeit, z. B. von Quarzporphyr, sehr stark unterscheidet. Es müssen sowohl andere Bohrgeräte als auch ein anderes Sprengregime angewendet werden. Das Laden des Haufwerks erfolgt ebenfalls mit großen Elektro-Löffelbaggern, der Abtransport bisher jedoch ausschließlich mit schweren LKW von bis zu 40 t Tragfähigkeit. Die LKW kippen es in einen stationären oder halbstationären Vorbrecher im Tagebau. Das gebrochene Haufwerk von < 300 mm Kantenlänge kann dann mit stationären Gurtbandförderern aus dem Tagebau heraus zur Nachaufbereitung transportiert werden.
Erztagebau. Die größten existierenden Tagebaue sind z. Z. noch Erztagebaue mit Jahresfördermengen bis 44 Mio t. Die Ausrüstung und Abbauplanung sind so unterschiedlich, wie die anstehenden Erze und die Lagerstätten es sind. Das reicht von der Technologie der Seifenerzgewinnung bis zu dem Abbau von außerordentlich festen Eisenquarziten, von der Gewinnung flacher Flözlagerstätten bis zum Abbau steilstehender Rohstoffkörper und von der oberflächennahen Gewinnung bis zum Abbau in großen Teufen. Als Beispiel für den Abbau eines steilstehenden Erzkörpers soll ein Kupfererztagebau kurz beschrieben werden. Für diese Bedingungen kommt ein Abbau nach der Tiefe in Frage. Die Wandhöhe zwischen 2 Arbeitsebenen beträgt jeweils 10 bis 15 m. Bei einer Abbautiefe von 300 m sind also 20 bis 30 Abbaustrossen erforderlich, die rundherum in den Standböschungen des Abbauraums angeordnet werden (Tafel 4). Das Lösen des Erzes erfolgt durch Großbohrlochsprengungen, wobei Abschläge von 1 Mio t keine Seltenheit sind. Das Haufwerk wird mit großen Löffelbaggern mit bis zu 15 m³ Löffelinhalt geladen. Der Abtransport erfolgt mit Zügen und großen LKW mit Tragmassen bis 200 t zu den Vorbrechern.
Die Arbeitsproduktivität wächst i. allg. mit der Größe der Ausrüstungen. Die Selbstkosten pro Tonne Erz nehmen bei größeren Tagebauen ab. Allerdings hat die Größe der Ausrüstungen eine Grenze in den Lagerungsbedingungen des Rohstoffs und in den Qualitätsforderungen.

1.2.5. Wiedernutzbarmachung

Die Bergbaubetriebe haben in der DDR die Auflage, der Land- und Forstwirtschaft entzogene Flächen nach dem Abbau wieder zurückzugeben. Dabei bezeichnet man alle Maßnahmen, die im volkswirtschaftlichen und territorialen Interesse notwendig sind, um die für den Bergbau nicht mehr benötigten Flächen einer Folgenutzung zuzuführen, als *Wiedernutzbarmachung*. Sie gliedert sich in die Teilgebiete Wiederurbarmachung und Rekultivierung. Der Bergbau richtet nach dem Abbau im jeweiligen Gebiet die entzogenen Bodenflächen so her, daß

sie rekultiviert werden können(Wiederurbarmachung). Zur Rekultivierung zählen alle Maßnahmen, die notwendig sind, um auf den wieder urbar gemachten und der Land- bzw. Forstwirtschaft zur Verfügung gestellten Flächen eine ständig steigende Bodenfruchtbarkeit zu erreichen.
Wiederurbarmachung beinhaltet vor allem die Verkippung des Tagebauraums, so daß die alten Vorflutverhältnisse wieder hergestellt werden. Dabei sind in die oberflächennahen Schichten möglichst kulturfähige Böden einzubauen. Sind die Voraussetzungen dafür nicht gegeben, so ist zumindest meliorationsbedürftiger Abraum aufzutragen, dessen kulturfeindliche Eigenschaften vor einer land- oder forstwirtschaftlichen Nutzung durch eine entsprechende Grundmelioration zu beseitigen sind.
Zur *Rekultivierung* gehören bodenphysikalische und biologische Untersuchungen sowie daraus abgeleitete Maßnahmen zur Ertragssteigerung auf den wieder urbar gemachten Flächen. Durch Zugaben von Kalk, Schlämmen aus den Veredelungsanlagen usw. konnte auf rekultivierten Flächen eine Bodenfruchtbarkeit erreicht werden, die weit über den Ausgangswerten derselben Flächen vor der Devastierung durch den Bergbau lag. Vor allem in der Lausitz wurde auf den rekultivierten Flächen eine Bodenfruchtbarkeit erreicht, wie sie die armen Sandböden nicht aufwiesen. Auf ehemaligen Kippen finden sich Obstplantagen, Gemüsefelder, land- und forstwirtschaftliche Nutzflächen und sogar Weinberge, wie das Beispiel des Tagebaus Visonta in der Ungarischen VR zeigt.
Ein besonderes Problem der Wiedernutzbarmachung ist die Folgenutzung der Restlöcher. Durch das Massendefizit der gewonnenen Rohstoffe entstehen in der Auslaufphase von Tagebauen große Restlöcher. Es wird ständig daran gearbeitet, die Gestaltung der Restlöcher in die Landschaftsverbesserung einzubeziehen. Bei trockenen Restlöchern, vor allem von Festgesteinstagebauen, ohne später entstehende Wasseransammlung besteht die Möglichkeit, nach Auftragen von kulturfähigen Böden auf die Böschungen und die Tagebausohle eine forstwirtschaftliche Nutzung vorzunehmen. Gut abdichtbare Restlöcher im Festgestein sind als Mülldeponien großer Städte geeignet. Tagebaue, in denen Naßgewinnung oder ein späterer Grundwasserwiederanstieg erfolgt, werden als Wasserspeicher der Wasserwirtschaft und als Naherholungsgebiete sowie als Seen für die Fischwirtschaft genutzt. Die bekanntesten Beispiele sind bisher der Knappensee bei Hoyerswerda und der Senftenberger See. In diesem Bereich der Lausitz wird mit dem Auslaufen weiterer Tagebaue in den nächsten Jahrzehnten ein ausgedehntes Seengebiet entstehen.

1.2.6. Tagebausicherheit

Sie umfaßt die Sicherheit von Personen, der Tagesoberfläche und des öffentlichen Verkehrs im Wirkungsbereich des Tagebaus, der Grubenbaue und der sonstigen bergbaulichen Anlagen, wie Tagebaugeräte, Förderanlagen usw. Die *geotechnische Sicherheit* berücksichtigt vor allem hydrologische Gefährdungen und die Verhinderung von ungewollten Boden- und Gesteinsbewegungen durch eine sichere Gestaltung der Arbeitsebenen und der Böschungen in Tagebauen. Mit zunehmenden Tagebaugrößen und hohen Böschungssystemen wachsen vor allem in tieferen Tagebauen die Anforderungen an die geotechnische Sicherheit. Diese Aussage trifft sowohl für Tagebaue im Lockergestein als auch im Festgestein zu. Die *Tagebaugerätesicherheit* dient einem sicheren Betreiben der verschiedenen Arten von Tagebaugeräten unter den unterschiedlichsten Bedingungen eines Abbaus im Tagebau. Besondere Momente sind das Befahren von Rampen, das Arbeiten auf schiefen Ebenen, die Gefahren durch Windkräfte und Witterungseinflüsse, der Schutz vor Überlastungen, der Brandschutz usw. Tagebaugeräte müssen nach den Vorschriften besonderen Kontrollen unterworfen werden. Havarien an Tagebaugeräten können zu erheblichen volkswirtschaftlichen Verlusten führen. Unter *Werkbahnsicherheit* wird der Komplex von Sicherungsmaßnahmen im Zusammenhang mit dem Betreiben von Industriebahnen verstanden. Sie dienen vor allem der Überprüfung des technischen Zustandes des rollenden Materials, dem Schutz vor Zugzusammenstößen durch Gleissicherungsanlagen und Fahrbetriebsvorschriften, der Sicherheit beim Rangieren und dem Schutz gegen Entgleisungen. Außer den genannten gibt es beim Abbau unter wechselnden geologischen und Witterungsbedingungen beim Einsatz einer hochentwickelten Technik weitere Sicherheitsprobleme.

1.3. Bergbau-Tiefbau

1.3.1. Die oberste Erdkruste als Gegenstand des untertägigen Bergbaus

Im allgemeinen wird dem übertägigen vor dem untertägigen Bergbau der Vorzug gegeben, soweit es die Bedingungen hinsichtlich Lagerstätte, technischer Beherrschung und Wirtschaftlichkeit zulassen. Der Bergbau-Tiefbau ist also dort erforderlich, wo z. B. die Tiefe einer Lagerstätte für einen Tagebau (vgl. 1.2.) zu groß ist. Die Anwendungsgrenzen für Tage- und Tiefbau sind von sehr vielen natürlichen, technischen und gesellschaftlichen Faktoren abhängig. Jahrhundertelanger intensiver Bergbau in vielen Ländern, damit verbundene Erschöpfung oberflächennaher Lagerstätten und steigender Roh-

stoffbedarf sind weitere Gründe für die Anwendung des technisch schwierigen und ökonomisch manchmal ungünstigeren untertägigen Bergbaus.

Der untertägige Bergbau beschränkt sich auf den Abbau der *Rohstoffe mit festem Aggregatzustand*, z. B. Erze, Kalisalze, Steinkohle, Flußspat, Ton. Der für den Bergbau interessante Bereich der Erdkruste – man erwartet, daß mit 5 km Tiefe das endgültige Maximum erreicht sein wird – trägt die Spuren und die Zufälligkeiten einer Jahrmillionen langen Erdgeschichte, in deren Gefolge es zu gelegentlichen, über die Erde sehr ungleichmäßig verteilten Anreicherungen nutzbarer Stoffe gekommen ist.

Lagerstättenformen. *Flöze* sind großflächige Ablagerungen in den Geosynklinalen, den Senkungsbereichen.

Gänge sind Erzkörper, die an Klüfte und Spalten gebunden sind und Granitkuppeln durchstoßen.

Stöcke stellen ausgedehnte, unregelmäßige Lagerstätten dar, die meist netzartig von Gängen durchzogen sind.

Seifen nennt man Anreicherungen von schweren Mineralen in Sand- und Geröllablagerungen.

Abb. 1.3.1-1 zeigt eine schichtförmige Lagerstätte, z. B. Steinkohle, Eisenerz, Kalisalz, mit einer häufig anzutreffenden geologischen Störung, einer Verwerfung. Dadurch werden Erkundung und Abbau erschwert.

Lagerstättenbezogene Faktoren wirken sich neben der Lagerstättenform in starkem Maße auf die Wahl des Abbauverfahrens bzw. – systems und damit auf die einzusetzende Technik und den wirtschaftlichen Erfolg des Bergbaus aus. Es sind vor allem die geometrischen Größen, wie Lagerstättentiefe, die räumliche Ausdehnung, das Einfallen der Lagerstätte und die Schichtenfolge in der Lagerstättenumgebung. Von der Tiefe eines Abbauhorizonts hängen z. B. die Temperatur am Arbeitsort, die Technik, der Effekt der Schachtförderung und die geomechanischen Sicherheitsmaßnahmen ab. Eine bedeutende Einflußgröße ist auch die Wassergefährdung einer Lagerstätte durch natürliche Wasserspeicher im Gebirge.

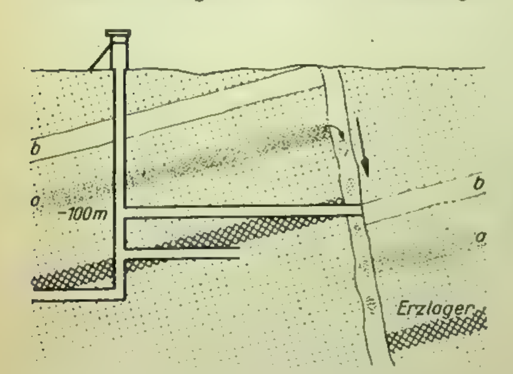


Abb. 1.3.1-1 *Sedimentlagerstätte (Flöz) mit einer Verwerfung*

1.3.2. Die Geomechanik als Grundlage für die Beherrschung der Hohlräume und eine hohe Lagerstättenausnutzung

Die *Geomechanik* beschäftigt sich mit den sicherheitstechnischen und technisch-wirtschaftlichen Aspekten des Bergbaus. Im Ergebnis der geomechanischen Untersuchungen sollen die Arbeitsplatzsicherheit und die optimale Lagerstättennutzung weitestgehend gewährleistet sein. Es sollen nicht zu viel Vorräte stehenbleiben bzw. nicht durch Katastrophen, wie Wassereinbrüche oder Zusammenbrechen des Grubengebäudes, verlorengehen.

Der Körper, mit dem sich die Geomechanik befaßt, ist das *Gebirge*. Darunter wird der Bereich der Erdkruste verstanden, in dem *Grubenbaue*, wie Schächte, Strecken, Abbaue, Bohrungen, hergestellt werden. Das Gebirge hat im Gegensatz zu den technischen Körpern Eigenschaften, die dem Menschen durch die erdgeschichtliche Entwicklung vorgegeben sind und außerdem zunächst unbekannt, oft unbeständig und schwierig zu ermitteln sind. Solche Eigenschaften beziehen sich auf den Spannungs-

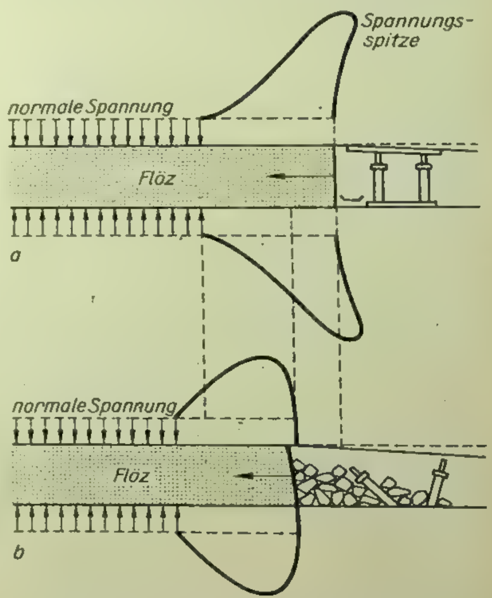


Abb. 1.3.2-1 *Veränderung des Spannungsverlaufs durch einen Gebirgsschlag in einem Strebabbau **a** vor und **b** nach dem Gebirgsschlag*

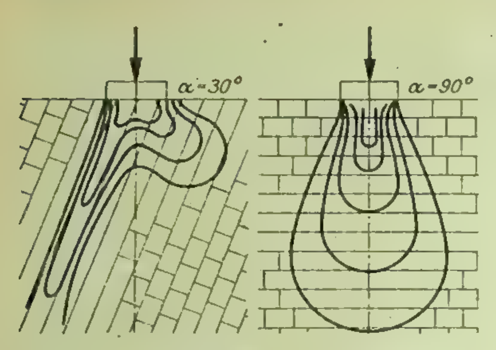


Abb. 1.3.2-2 Einfluß der Schichtneigung auf die Spannungsverteilung

zustand und das Verformungs- und Bruchverhalten des Gebirges. Bevor man im Gebirge einen Hohlraum herstellt, besteht dort ein Grundspannungszustand, der vom Abstand zur Erdoberfläche, der Teufe, und von der erdgeschichtlichen Vergangenheit des jeweiligen Gebiets abhängig ist. Durch die Hohlraumherstellung wird dieser Zustand verändert. Zusammen bewirken die Spannungen in Wechselwirkung mit den Materialeigenschaften des Gebirges, ob und in welchem Grad ein Grubenbau stabil und sicher ist (Abb. 1.3.2-1). Die Beurteilung und Prognose dieser Standsicherheit ist eine geomechanische Hauptaufgabe, deren Lösung äußerst kompliziert und daher nur näherungsweise möglich ist. Dabei spielt die Struktur des Gebirges eine schwer faßbare Rolle (Abb. 1.3.2-2).

Ein unterirdisch aufgefahrenes Hohlraumsystem nennt man *Grubengebäude*, dessen max. Ausdehnungen die Fläche einer Stadt wie Leipzig erreichen kann. Dieses „Gebäude" muß nach zuverlässigen Konstruktionsprinzipien gebaut werden, damit bei genügender Sicherheit für Mensch und Lagerstätte der ökonomische Aufwand für die Aufrechterhaltung der Standsicherheit minimal ist, ungewollte Schäden in den Grubenbauen und an der zugehörigen Erdoberfläche vermieden werden und vor allem die Lagerstätte mit hohem volkswirtschaftlichem Effekt und geringen Vorratsverlusten abgebaut werden kann.

Der *moderne Bergbau* muß trotz seiner naturgegebenen Schwierigkeiten verstärkt zur wissenschaftlichen Projektvorbereitung, Planung und Überwachung der untertägigen Prozesse übergehen. Ungünstiger werdende Bedingungen müssen beherrscht werden, z. B. der Übergang zu größeren Tiefen und der Zwang, auch wertstoffärmere, gasreiche und gebirgsschlaggefährdete Lagerstätten abzubauen. Die Entwicklungstendenzen im Bergbau sind charakterisiert durch zunehmende Größe des Grubengebäudes, Konzentration der Gewinnung in wenigen Abbaufeldern einer Grube und Mechanisierung und schrittweise Automatisierung der Betriebsprozesse. Als ideales Endziel wird ein ferngesteuerter automatisierter Abbau angesehen, wie er im Steinkohlenbergbau der Sowjetunion, Großbritanniens und Polens bereits erprobt wird. Die automatische Schachtförderung ist heute schon nichts Ungewöhnliches mehr. Die hohen Grundmittelkosten eines modernen Bergbaubetriebs und die angestrebte Kapazitätsauslastung der Ausrüstungen sind Gründe dafür, daß längere Störungen des Betriebs oder gar Katastrophen wegen ungenügender geomechanischer Beherrschung des Bergwerks ein zu hohes sicherheitliches und wirtschaftliches Risiko darstellen und nicht zu verantworten sind.

Vermeidung und Steuerung von Bruchvorgängen. Falls die Spannungsanalyse und der rechnerische Vergleich der zu erwartenden max. Gebirgsspannungen mit der Festigkeit des Gebirges eine Bruchgefahr ergibt, dann steht die Frage nach den Maßnahmen zur Vermeidung oder oft auch zur Steuerung der Bruchvorgänge. Die Maßnahmen ergeben sich aus den Konstruktions- und Dimensionierungsregeln. Für Grubenräume mit einer nur für kurze Zeit erforderlichen Lebens-

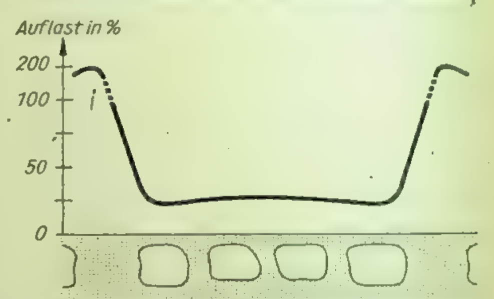


Abb. 1.3.2-3 Auflastverteilung über verschieden breiten, zwischen Abbaukammern angeordneten Pfeilern in einer Kupfergrube

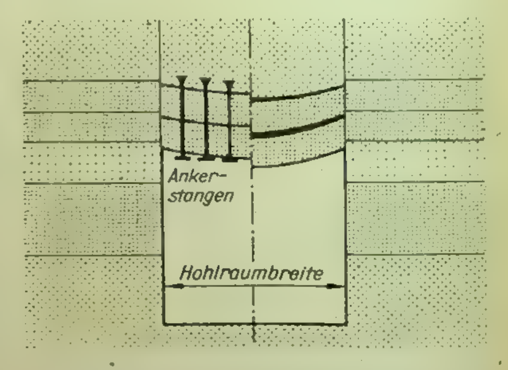


Abb. 1.3.2-4 Schichtenverformung mit und ohne Ankerung der Hohlraumfirste

dauer, z. B. Abbaukammern (Abb. 1.3.2-3), wird das Zubruchgehen in steuerbaren Grenzen zugelassen. Grubenräume mit langer Funktionsdauer, z. B. Hauptförderstrecken, Schächte, Krafthauskavernen, müssen dagegen für Jahrzehnte oder mehr als ein Jahrhundert standsicher und somit funktionssicher sein.

Als *Sicherungsmaßnahmen* werden gegenwärtig angewendet:

– Sicherung der Hohlraumkonturen durch eine äußere Gegenkraft, z. B. hydraulische Stahlstempel (Tafel 3),
– Erhaltung der Eigentragfähigkeit des Gebirges durch Auskleidung der Hohlräume mit Spritzbeton oder Ankern (Abb. 1.3.2-4),
– Wiederherstellung der Eigentragfähigkeit des Gebirges durch Gebirgsvergütung, wie Injektion mit Zementmilch oder Kunststoffen,
– Verlagerung der Spannungsspitze von der Konturnähe weg in das Gebirge durch Entlastungsschlitze und durch Auflockerungssprengen, z. B. zur Bekämpfung von plötzlichen Ausbrüchen von Gas und Gestein oder von Gebirgsschlägen.

1.3.3. Vorrichtung und Abbau von Lagerstätten

An die Erkundung einer Lagerstätte oder eines Lagerstättenteils schließt sich auf der Grundlage eines Projekts die Vorrichtung und der Abbau und nach Erschöpfung der Lagerstätte die Verwahrung an.

Vorrichtung. Mit der Vorrichtung wird die Lagerstätte zum Abbau vorbereitet, es werden also die für die Bewetterung (Luftzuführung, Klimatisierung) und den Transport von Menschen, Maschinen, Rohstoffen, Wasser und Hilfsmaterial erforderlichen röhrenartigen Hohlräume hergestellt. Dazu zählen vor allem *Schächte*, *Strekken* und *Stollen*. Abb. 1.3.3-1 zeigt die Vorrichtung am Beispiel der Freiberger Erzganglagerstätte, die aus einem nahezu rechtwinkligen steileinfallenden Spaltensystem besteht. Der Schacht wird entweder in Einfallrichtung des Gangs (ältere Variante *A*) oder lotrecht als *Richtschacht* abgeteuft (moderne Variante *B*). Vom Richtschacht aus wird über Strecken (Querschläge und Gangstrecken) der Zugang zur Lagerstätte geschaffen. Wichtig ist eine günstige Lage der Schächte zur Lagerstätte, z. B. wegen der Länge der unterirdischen Transportwege.

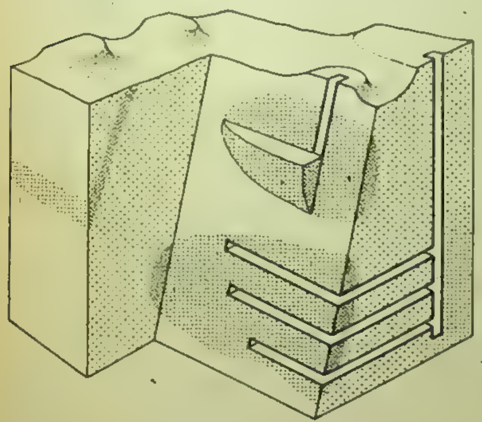


Abb. 1.3.3-1 Vorrichtung und Abbau eines steilen Erzgangs

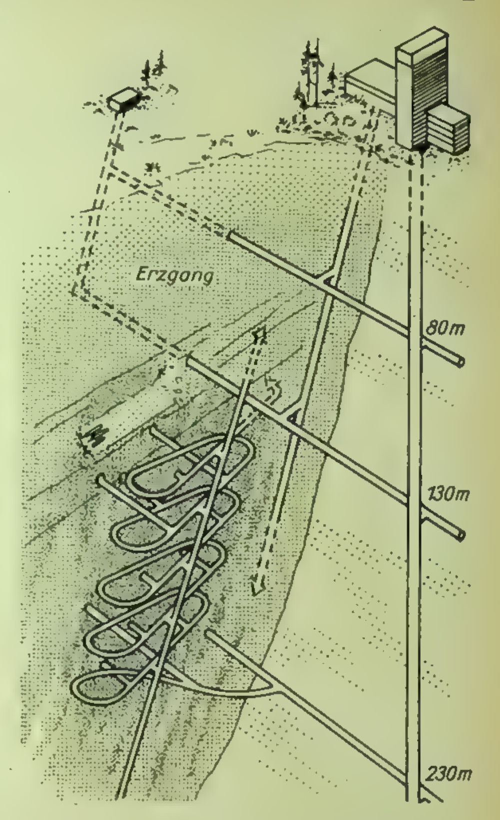


Abb. 1.3.3-2 Vorrichtung einer steilen Erzlagerstätte durch Schächte und Strecken (horizontal und wendelförmig)

Der tiefste Schacht ist gegenwärtig 2200 m tief (Republik Südafrika). Noch darunter liegende Lagerstättenteile müssen mit Blindschächten angeschlossen werden. Die Art und Weise der Vorrichtung hängt vom Lagerstättentyp und vom Stand der Technik ab, wie das Beispiel der Rampentechnik im Erzbergbau zeigt (Abb. 1.3.3-2). Hier wird der Transport über große Entfernungen in Wendelstrecken mit gummibereiften Kraftfahrzeugen durchgeführt, die oft als Kombination von Lade- und Transportfahrzeug ausgebildet sind. Das Herstellen der Vorrichtungsabbaue erfolgt inner- und

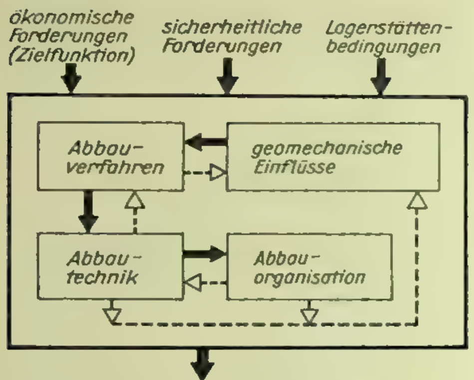


Abb. 1.3.3-3 *Das System Abbau*

außerhalb der Lagerstätte in verschieden geneigten oder söhligen (horizontalen) Richtungen. Für viele Lagerstättenformen sind mehrere Sohlen, d. h. Grubenbaue in einem Horizont, in Abständen von z. B. 100 m erforderlich. Die Sohlenstrecken und die übrigen Vorrichtungsbaue unterteilen die Lagerstätte in Arbeitsabschnitte, aus denen mit sehr vielen und unterschiedlichen Abbauverfahren der Rohstoff abgebaut und zur Erdoberfläche transportiert wird.

Abbauverfahren sind neben der Abbautechnik (vgl. 1.3.4.) und -organisation ein Teil des *Systems Abbau* (Abb. 1.3.3-3). Man unterscheidet die Verfahren nach Abbauform, Art der Behandlung des Dachs und des Deckgebirges, der Arbeitsräume sowie Abbauführung, d. h. der Richtung und Reihenfolge des Abbaus. Abbauverfahren und -technik stehen in sehr enger Wechselwirkung. Häufig ist es sogar so, daß die Abbautechnik die Wahl des Abbauverfahrens bestimmt. Die geologischen Voraussetzungen stellen die wichtigsten naturgegebenen Randbedingungen für den Abbau dar. Dazu gehören z. B. die Mächtigkeit, das Einfallen, die Festigkeit und Gewinnbarkeit der Lagerstätte, ferner die Tektonik, die Gas- und Wasserführung in der Lagerstätte und im umgebenden Gebirge, die Schichtenfolge über und unter der Lagerstätte sowie die Vorratsmenge an Rohstoffen. Derartige Einflußfaktoren müssen im Komplex geprüft werden. So wirkt sich die Mächtigkeit vor allem auf die Abbauform und auf die Beherrschung des Gebirges aus; die Härte und Festigkeit bestimmen dagegen die Art der Gewinnungstechnik, z. B. maschinell oder durch Sprengen.

Im Weltbergbau sind über 100 Abbauverfahren bekannt. Die große Zahl ist u. a. wegen der sehr unterschiedlichen und komplizierten geologischen und geomechanischen Bedingungen erforderlich. Man kann die Abbauverfahren bestimmten Lagerstättenformen zuordnen, die man in gering- bis mittelmächtige (bis 8 m), mächtige (bis 20 m) und sehr mächtige (bis 50 m), sowie nach dem Einfallen in horizontale bzw. geneigte bis steile (0 bis 90°) Lagerstätten klassifizieren kann.

Kammerpfeilerbruchbau. Die Abb. 1.3.3-4 zeigt, wie eine horizontale Flözlagerstätte aus Sedimenten, z. B. Kali, Steinkohle, Eisenerz, nach diesem Verfahren abgebaut wird. Durch Strekken wird das Flöz in Abschnitte aufgeteilt, in denen Kammern aufgefahren werden. Die zunächst stehenbleibenden Pfeiler werden abschnittweise gesprengt, so daß die Dachschichten herunterbrechen und die Kammern verschütten. Durch diese Bruchbereiche werden die be-

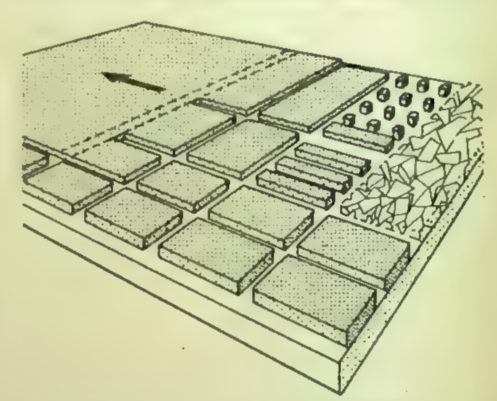


Abb. 1.3.3-4 *Abbau einer Flözlagerstätte durch Kammerpfeilerbruchbau*

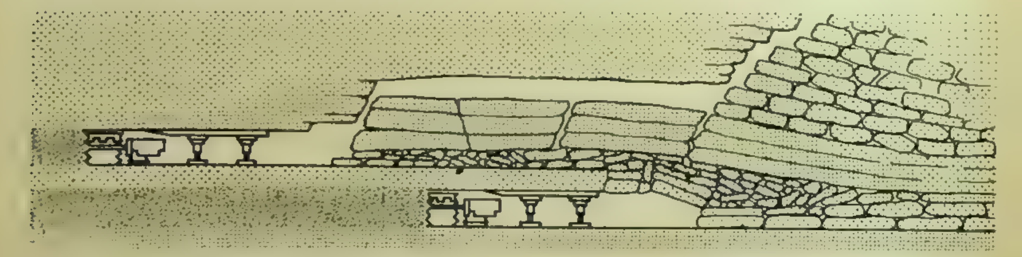


Abb. 1.3.3-5 *Strebbruchbau in 2 jeweils 1 m hohen Scheiben in einer Kaligrube*

nachbarten Arbeitsorte vor eventuell gefährlichen Spannungskonzentrationen und daraus resultierenden ungewollten Zusammenbrüchen geschützt.

Strebbau. Hierbei wird die Flözlagerstätte fast verlustlos genutzt. Den Arbeitsraum stützen hierbei nicht Pfeiler aus Lagerstättensubstanz, sondern Stempel. Dieser Ausbau bestand früher aus hölzernen oder stählernen Einzelstempeln mit Kappen, die am Dach anliegen. Heute dominiert der ferngesteuerte selbstschreitende hydraulische Ausbau. Ist die Mächtigkeit des Flözes zu groß oder müssen taube Schichten beachtet werden, dann kann man den Strebbau in mehreren Scheiben anwenden (Abb. 1.3.3-5). Den abgebauten Teil kann man zu Bruch gehen lassen oder durch Versatz (taubes Gestein, Sand u. ä.) wieder verfüllen. Strebbau wird in manchen Bergbaugebieten bereits vollautomatisch durchgeführt (Tafel 3). Die Bedienung der Gewinnungsmaschinen erfolgt von den angrenzenden Strecken aus.

Firstenstoßbau wird bei steiler Lagerung und schwierigen Bedingungen, z. B. geringe Standfestigkeit des umgebenden Gebirges oder häufiger Wechsel der Lagerstättenmächtigkeit, angewendet (Abb. 1.3.3-6). Der zur Sicherung gegen Zusammenbruch laufend eingebrachte Versatz bildet die Arbeitsebene für die Gewinnungsarbeiten im Abbau, der stets nach oben, also in Richtung Firste, geführt wird. Bei standfesterem Nebengestein kann auch ohne Versatz gearbeitet werden, indem das durch Bohren und Sprengen gewonnene Haufwerk vorübergehend magaziniert wird.

Teilsohlenbau (Abb. 1.3.3-7) ist ein modernes Abbauverfahren, bei dem z. B. eine fahrstuhlartige Arbeitsbühne für das Bohren langer Löcher und das Einbringen des Sprengstoffs eingesetzt wird. Der besondere Vorteil liegt hier in der Ausnutzung der Schwerkraft für die Abbauförderung. Man braucht also keine Lade- und Transportmaschinen im Abbau einzusetzen.

Geotechnologische Verfahren werden zunehmend als Abbau- und Gewinnungsverfahren für ärmere Lagerstätten eingesetzt. Ihre Vorteile liegen darin, daß sie teure und aufwendige Operationen des bergmännischen Abbaus und den Aufenthalt von Menschen im Bergwerk vermeiden. Die geotechnologischen Verfahren beruhen auf der selektiven Extraktion der nutzbaren Komponente am Ort ihrer natürlichen Ablagerung. Sie nutzen dazu vorwiegend Unterschiede in den physikochemischen Eigenschaften der mineralischen Rohstoffe aus. Zum Teil ist es sogar möglich, den Abbau nur noch mittels speziell ausgerüsteter Systeme von Tagesbohrlöchern durchzuführen. Eine Zerkleinerung und Mahlung des Rohhaufwerks und die Aufhaldung der Rückstände können dann entfallen.

Neben den Prozessen Lösen und Laugen werden auch hydraulische, hydrothermale, elektrophysikalische und thermische Prozesse in Form der hydromechanischen Gewinnung von wertstoffhaltigen Sanden und Tonen, der Schwefelgewinnung und Untertagevergasung von Kohle genutzt.

Lösen. Die Salzlagerstätte (Stein- und Kalisalz) wird lediglich mit Bohrungen, also ohne Schächte und Strecken, angezapft, von denen aus das Salz aufgelöst und die Lösung nach oben zur Weiterverarbeitung gepumpt wird (Abb. 1.3.3-8). Die entstehenden Kavernen können nach Erschöp-

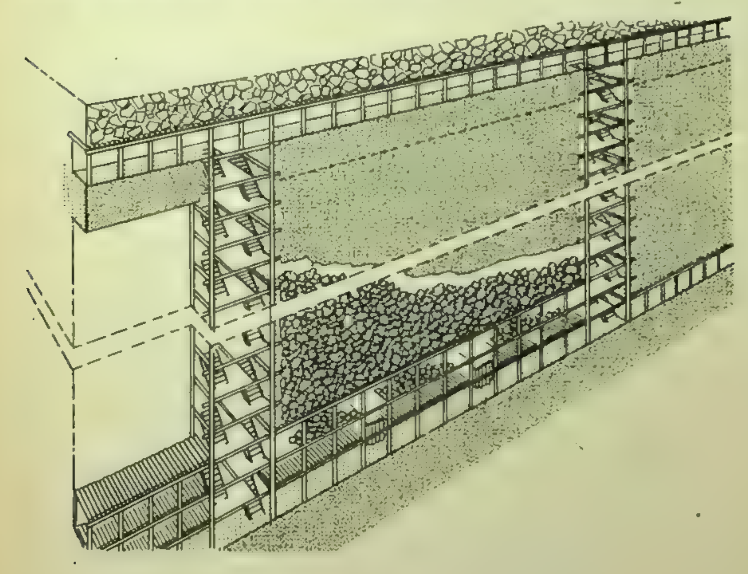


***Abb. 1.3.3-6** Firstenstoßbau mit Magazinierung des Erzes*

fung der Lagerstätte zur Lagerung von Gas (vgl. 2.4.4.), Öl oder Atommüll dienen.
Laugen. Bei der *Metallgewinnung durch Laugung* wird der Wertstoff, z. B. Uran oder Kupfer, unmittelbar aus der Lagerstätte durch Einsatz von Aufschlußmitteln, z. B. Schwefelsäure, gewonnen. Dazu werden Bohrungen von der Erdoberfläche oder von vorhandenen Grubenbauen aus hergestellt.
Auch traditionell durch Sprengen gewonnenes Haufwerk wird teilweise durch Laugung in den Grubenbauen behandelt. Die wertstoffangereicherte Lauge wird an die Erdoberfläche gepumpt und weiterverarbeitet (vgl. 3.3.).

1.3.4. Bergbautechnik

Zur Bergbautechnik gehören über die eigentliche Gewinnungstechnik hinaus alle technischen Prozesse und Ausrüstungen, die zum Abbau der Rohstoffe bzw. zur Herstellung unterirdischer Räume eingesetzt werden. Der moderne Bergbau ist dadurch charakterisiert, daß er die Errungenschaften der modernen Technik durch Anpassung bzw. Weiterentwicklung für die spezifischen Bergbaubedingungen möglichst voll ausnutzt, z. B. die Fahrzeugtechnik.
Schachtabteufen und Schachtförderung. *Schächte* als röhrenförmige, meist lotrechte Hohlräume von 3 bis 10 m Durchmesser sind Grubenbaue, die während der gesamten Lebensdauer eines Bergwerks, z. B. 50 Jahre, funktionssicher sein müssen. Die Herstellung der Schächte, das *Schachtabteufen*, erfolgt mit Methoden, die vor allem von der Gewinnbarkeit und den Wasserzuflüssen sowie der Teufe, der Tiefe unter der Erdoberfläche, abhängig sind. Wichtige Verfahren sind die „bergmännischen Verfahren" mittels *Bohren* und *Sprengen* sowie Greifern und Förderkübeln sowie das *Schachtbohren*. Im

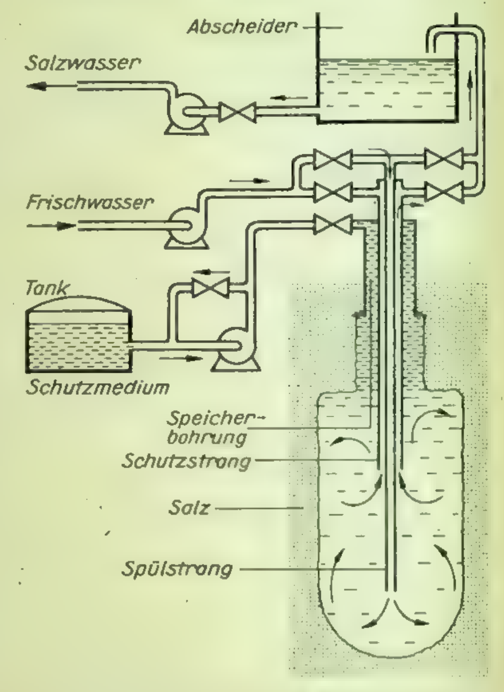


Abb. 1.3.3-8 Herstellen einer Kaverne durch Salzauflösung

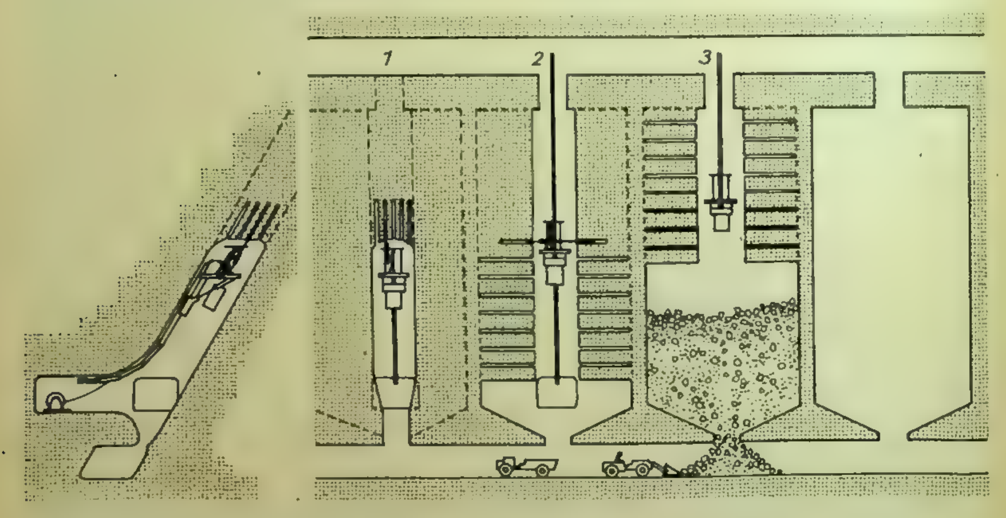


Abb. 1.3.3-7 Abbau einer steilen Lagerstätte von einer Arbeitsbühne aus: 1 schachtartige Auffahrung zwischen 2 Sohlen, 2 Herstellen langer Sprengbohrlöcher, 3 Sprengen, Laden und Transport des Haufwerks

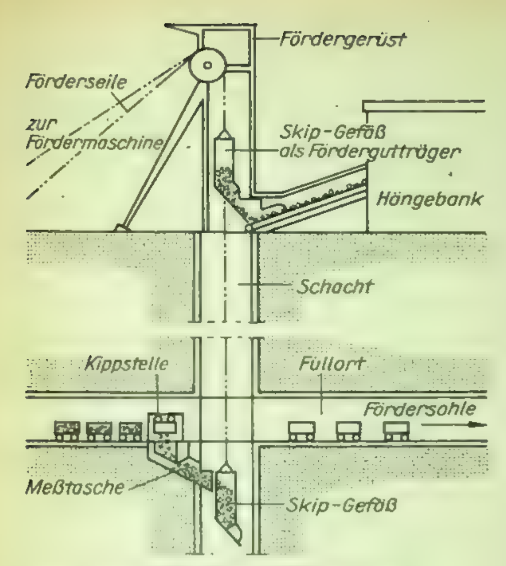


Abb. 1.3.4-1 Skip-Schachtförderanlage

Kampf gegen gefährliche Wasserzuflüsse werden Spezialverfahren eingesetzt, z. B. *Gefrierverfahren* mit Frostzylinder um die zu teufende Schachtröhre und wasserdichtem Schachtausbau sowie *Zementier-* bzw. *Injektionsverfahren*.

Die *Schachtförderung* wird häufig mittels *Skip-Anlagen* (Abb. 1.3.4-1) mit teilweise automatischem Betrieb durchgeführt. Die Größe der Jahresförderung eines Bergwerks wird durch die Kapazität der angeschlossenen Schachtförderanlagen bestimmt.

Streckenauffahrung und -förderung. Das Auffahren von söhligen oder geneigten Strecken erfolgt in der Lagerstätte oder ihrer Umgebung, ähnlich wie der Vortrieb von Tunneln und Stollen, hauptsächlich nach 2 Methoden:

– *Vortrieb durch Bohren und Sprengen,*
– *maschineller Vortrieb durch Vortriebsmaschinen.*

Bohren und Sprengen. Das Bohren der Sprengbohrlöcher erfolgt fast nur noch mit *Bohrwagen* (Tafel 1), auf denen bis zu 4 Bohrmaschinen elektrisch, pneumatisch oder auch hydraulisch angetrieben werden (Abb. 1.3.4-2, Tafel 4). Drehendes Bohren ist nur in weniger harten bzw. festen Gesteinsarten möglich, z. B. in Kalisalzen, Kupferschiefer, Steinkohle. Für festere Gesteinsarten wurden über 100 Jahre lang pneumatisch betriebene Bohrmaschinen mit schlagendem oder drehschlagendem Prinzip eingesetzt. Die hydraulisch betriebenen Bohrausrüstungen sind umweltfreundlicher und leistungsstärker, weshalb sich ihr Einsatzbereich sicherlich erweitern wird. Zu den Vorzügen gegenüber den pneumatischen Bohrmaschinen gehören z. B. der Wegfall der Ölnebel und eine erhebliche Senkung des Schallpegels, eine bessere Anpassungsfähigkeit der energetischen Parameter an die Gesteinsart sowie eine Reduzierung des Bohrstahlverbrauchs.

Die Bohrlöcher werden hinsichtlich Richtung, Abstand und Länge in verschiedener Weise angeordnet und teilweise oder völlig mit *Sprengstoff*, meist Dynamit, gefüllt. Bei der Detonation des brisanten Sprengstoffs tritt eine Detonationsgeschwindigkeit von 1000 bis 9000 m/s auf. Die bei der Explosion entstehenden Gase zertrümmern das Gestein und bewirken die Bildung von giftigen Sprengschwaden. Heute werden hauptsächlich brisante Sprengstoffe in patronierter oder loser Form eingesetzt. Zur Einleitung der Explosion wird meist die elektrische Zündung mit Zündschnur, Sprengkapsel und Millisekundenzünder verwendet. Bei einem Bohrschema ist die Art des Einbruchs besonders wichtig, z. B. *Kegel-*, *Keil-*, *Fächer-* oder *Zylindereinbruch*. Der Zylindereinbruch gewinnt ständig an Bedeutung, weil er sich an die modernen Bohrausrüstungen gut anpaßt und große Abschlagslängen, z. B. 5 m, erlaubt.

Durch *schonendes Sprengen* läßt sich eine genauere Streckenkontur herstellen, und die seismische Beanspruchung (Rißbildung) im umgebenden Gebirge ist geringer. Durch den geringeren Mehrausbruch und weniger Ausbauarbeiten sinken die Kosten.

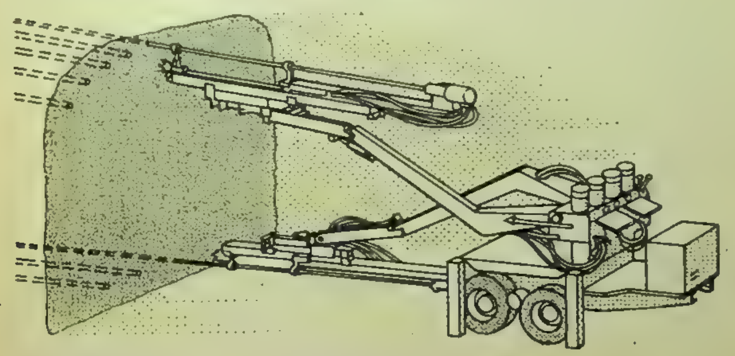


Abb. 1.3.4-2 Zweiarmiger Bohrwagen

Der *maschinelle Strecken- und Tunnelvortrieb* hat sich in den letzten Jahren verstärkt durchgesetzt. Im Prinzip sind solche Vortriebsmaschinen ähnlich wie Bohrmaschinen, nur daß sie größere Querschnitte (meist 3 bis 5 m Durchmesser) freilegen und spezielle Gewinnungsorgane haben. Je nach Härte und Festigkeit des zu durchfahrenden Gebirges werden z. B. Hartmetallschneiden für Kohle und Salz und Rollenbohrer für Sandstein, Granit und Gneis eingesetzt (Abb. 1.3.4-3). Die Vortriebsmaschinen arbeiten häufig ferngesteuert bzw. automatisch und erreichen max. Leistungen von 2000 m/Monat. Teilschnittmaschinen haben eine 20 bis 40% geringere Vorschubkraft als Vollschnittmaschinen (Tafel 3). Die Werkzeuge wirken parallel oder quer zur Vortriebsrichtung. Das Quer- oder Hinterschneidprinzip erfordert geringere Andrücke, wodurch die Kosten für Werkzeuge und Energie verringert werden. Günstig ist bei allen Vortriebsmaschinen die Kombination von Schneid- und Brechvorgang (Abb. 1.3.4-4).

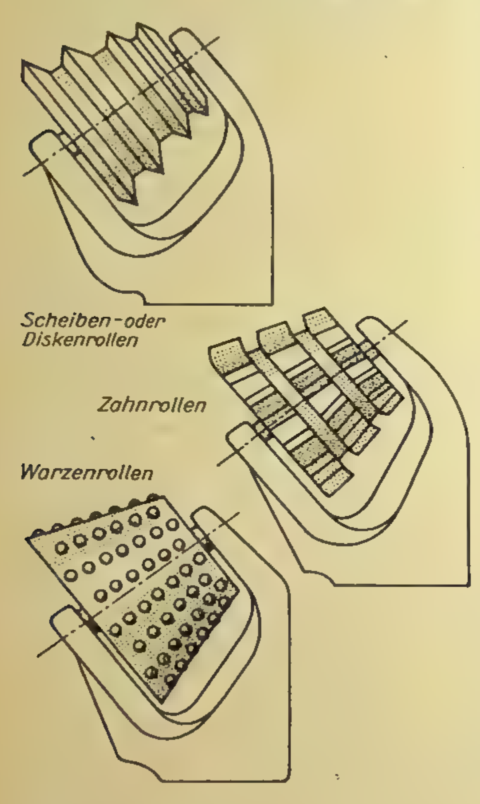


Abb. 1.3.4-3 *Rollenbohrwerkzeuge für Vortriebsmaschinen*

Für die *Streckenförderung* gelten die gleichen Prinzipien wie im Straßenverkehrswesen. In den letzten 2 Jahrzehnten hat sich neben den früher üblichen Methoden, vor allem schienengebundene Lokomotiv- und Seilbahnförderung, das Gummitransportband und das Lastkraftfahrzeug durchgesetzt. Durch die Strecken erfolgt der Transport sämtlicher Nutz- und Hilfsgüter sowie der Belegschaft.

Abbautechnik. Im Prinzip werden im Abbau (vgl. 1.3.3.) ähnliche technische Prozesse durchgeführt wie beim Streckenvortrieb, nämlich Gewinnen, Laden und Fördern.

Gewinnungsverfahren sind wie beim Streckenvortrieb das Bohren und Sprengen sowie die maschinelle Gewinnung (Tafel 3). Im Abbau, z. B. beim Kammerbau, kommen für die *maschinelle Gewinnung* auch Streckenvortriebsmaschinen zum Einsatz, z. B. im Kalibergbau. Darüber hinaus werden vor allem beim Strebbau (vgl. 1.3.3.) verschiedene Gewinnungsprinzipien durch Hobel- und Schrämmaschinen realisiert. Die maschinelle Gewinnung hat den Vorteil der Kontinuität, der Schonung des Gebirges und häufig auch der besseren Arbeitsbedingungen. Dem Einsatz der Gewinnungsmaschinen sind aber durch die Lagerstättenbedingungen Grenzen gesetzt, beispielsweise bei großen Mächtigkeiten oder bei der Gefahr, daß während der Gewinnungsarbeiten Gasausbrüche auftreten.

Bohren und Sprengen stellen daher das am weitesten verbreitete Gewinnungsverfahren dar. Die Gewinnung mit nichtmechanischer, z. B. thermischer und elektrischer, Zerstörung ist auf Sonderfälle beschränkt.

Das *Laden des Haufwerks* erfolgt heute meistens mit *Fahrladern*, die zugleich auch den Haufwerkstransport bis zum Anschluß an die

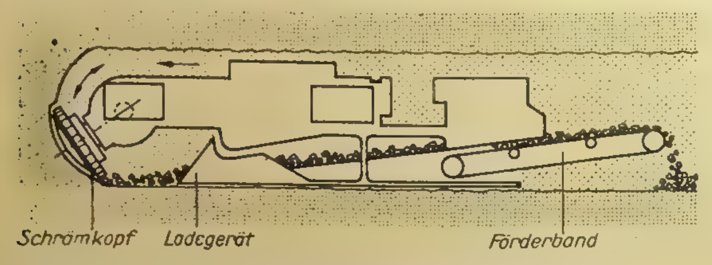


Abb. 1.3.4-4 *Vortriebsmaschine nach dem Hinterschneidprinzip*

Streckenfördermittel mit übernehmen. Sie übernehmen die Arbeitsvorgänge Laden, Transportieren und Entladen in einem Fahrzeug. Die Entwicklung solcher „gleisloser" Fahrzeuge hat seit 1960 erhebliche Fortschritte für die Abbautechnik gebracht, wie z. B. höhere Leistungen, geringere Kosten, bessere Umweltbedingungen. Der Anpassungsprozeß an weitere Lagerstättenbedingungen ist noch im Gange. Die gegenwärtig eingesetzten Tiefschaufelfahrlader erreichen 1 bis 15 m^3 Schaufelinhalt, können ab 1,8 m Abbauhöhe eingesetzt werden, haben Motorleistungen zwischen 35 und 165 kW und Gesamtlängen von 5 bis 10 m. Besondere Aufmerksamkeit im praktischen Einsatz verdienen die Qualität der Fahrstraßen sowie die Abgase und die Wärme, die durch die Verbrennungsmotoren im Arbeitsprozeß erzeugt werden. Das sind im Prinzip die gleichen Probleme wie beim übertägigen Straßenverkehr, nur daß durch die kurze planmäßige Lebensdauer der „Straßen" im Abbau von nur wenigen Monaten und die oftmals viele Kilometer weiten Entfernungen zur Frischluftquelle, dem Wetterschacht, die Aufgaben noch komplizierter sind.

Zur Abbautechnik gehören noch einige weitere technische Ausrüstungen, z. B. Fahrzeuge zum Sprengstoffeinblasen, Bohrwagen zum Einbringen von Ankerausbau, Beraubemaschinen zum Entfernen lockerer Gesteinsschalen, Ausrüstungen für das Einbringen von Versatz in die bereits abgebauten Räume sowie sicherheitstechnische Einrichtungen.

Technische Sicherheit. Durch die natürlichen Erschwernisse und Gefahren ist im Bergbau die Forderung nach Einheit von Produktion und technischer Sicherheit besonders zu unterstreichen. Im Zuge der technischen Revolution hat sich die Arbeit des Bergmanns verändert. Zu den traditionellen Gefahren, wie Steinfall, Wasserzuflüsse, Gasausbrüche, Brände und Explosionen, sind neue Gefahrenquellen, z. B. durch Abgase, Lärm und Strahlen, hinzugekommen. Die Bergbausicherheit hat vor allem zum Ziel, alle Arbeitsprozesse so durchzuführen, daß das Leben und die Gesundheit der Untertage-Belegschaft geschützt wird. Darüber hinaus wird der Schutz der Lagerstätte, z. B. gegen katastrophale Wasserzuflüsse oder Zusammenbrüche von Hohlräumen, und der technischen Ausrüstungen angestrebt. Auch die Sicherheit an der Tagesoberfläche gegen zu starke Senkungen und Erdfälle gehört zu diesen Aufgaben. Es gibt ein umfangreiches Vorschriftenwerk der Bergbausicherheit, das bei der Projektierung und Durchführung der bergbaulichen Prozesse zu beachten ist. Spezielle Kontrollorgane (Oberste Bergbehörde) überwachen die Einhaltung der sicherheitlichen Grundsätze. Das Ziel der sicherheitstechnischen Maßnahmen im untertägigen Bergbau besteht darin, trotz der häufig ungünstigen und sich schnell ändernden natürlichen Umweltbedingungen möglichst günstige Arbeitsplatzbedingungen zu schaffen. Ein für den Untertagebergbau in dieser Hinsicht besonders wichtiges Gebiet ist die Grubenbewetterung und das Grubenklima.

Das *Grubenklima* an einem Arbeitsplatz, z. B. Abbau oder Streckenvortriebsort, wird hauptsächlich bestimmt durch Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Wetter, d. h. der Frischluft, die auf dem Wege vom Schacht zum Arbeitsplatz ihre Zusammensetzung und Zu-

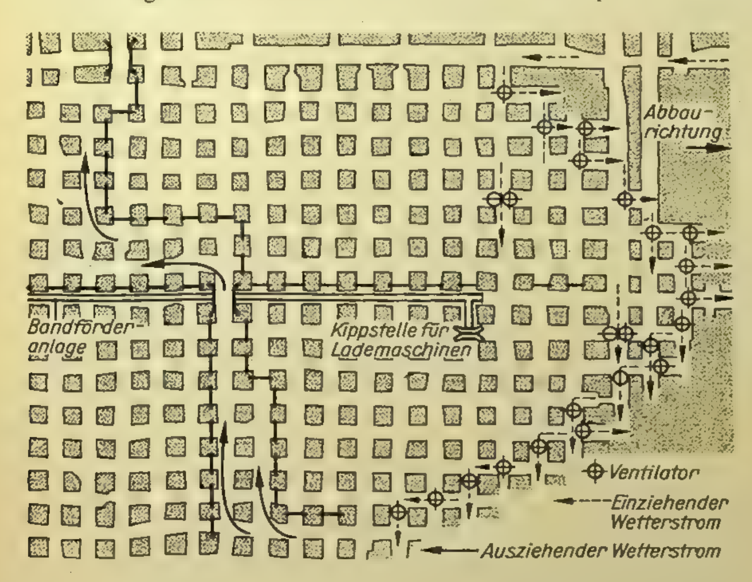


Abb. 1.3.4-5 Wetterführung bei Kammerbau mit quadratischen Pfeilern

standsgrößen verändern kann. An manchen Betriebspunkten, z. B. in der Kabine von Streckenvortriebsmaschinen, werden Wetterkühlmaschinen verwendet.

Bewetterung. Die Wettertechnik hat die Aufgabe, genügend Frischluft für Menschen und Maschinen zuzuführen, schädliche oder belästigende Gase und Stäube abzuführen und günstige grubenklimatische Bedingungen zu schaffen. Für die Wetterbewegung wird mit Lüftern ein Über- oder Unterdruck erzeugt. Die Wetterführung muß sich den täglich neuen Platzverhältnissen entsprechend dem Vortriebstempo anpassen. (Abb. 1.3.4-5). Besonders schwierige Bedingungen können in den Abbauen auftreten, z. B. durch große Räume, Sprengschwaden, Ansammlung von natürlichen Gasen, Gebirgswärme von großen Flächen, Abgase von Verbrennungsmotoren der Lade- und Förderfahrzeuge. Günstig für die Wetterführung ist eine hohe Betriebskonzentration.

1.4. Gewinnung von Erdöl und Erdgas

Erdöl und Erdgas werden gegenwärtig ausschließlich durch Bohrungen gewonnen. Die in früheren Jahren in oberflächennahen Lagerstätten durchgeführte bergmännische Erdölgewinnung durch den Abbau ölgesättigter Sande ist heute nicht mehr wirtschaftlich. Allerdings verfügen mehrere Länder, wie die UdSSR, USA, Kanada und Brasilien, noch über große Vorräte von Ölsanden und -schiefern, deren Ölgehalt jedoch vorerst nicht mit Hilfe von Bohrungen gewinnbar ist. Für diese Lagerstätten werden gegenwärtig rationelle bergmännische Gewinnungsverfahren bzw. unterirdische Extraktionsverfahren vorbereitet. Sie sind bisher jedoch noch nicht zur vollen wirtschaftlichen Reife gelangt und bilden die Reserven für jene Zeit, in denen durch die Bohrungen gewinnbaren Lagerstätten erschöpft sein werden.

Die *Abbautechnologie* von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen wird im Detail von den spezifischen Bedingungen einer Lagerstätte bestimmt. Zwar unterliegen die Strömungsvorgänge in porösen Gesteinen grundsätzlich den gleichen Gesetzmäßigkeiten, unabhängig davon, ob reines Erdöl, ein Gas-Öl-Gemisch oder reines Erdgas fließen; die Fließvorgänge von flüssigen Medien sind jedoch wesentlich komplizierter als die von gasförmigen, weil bei ersteren außer der höheren Viskosität noch einige zusätzliche Faktoren, wie z. B. das Benetzungsverhalten, weitaus stärker den gesamten Fließvorgang beeinflussen, als das beim Strömen gasförmiger Medien der Fall ist. Die *Mehrphasenströmung* flüssig-gasförmig ist am schwierigsten zu beherrschen, weil hierbei die Änderungen von Druck und Temperatur sowohl während des Strömungsvorgangs in der Lagerstätte als auch im Steigrohr die Fließeigenschaften der strömenden Medien wesentlich mit beeinflussen. Auch für die Dimensionierung einer Fördersonde ist es von erheblicher Bedeutung, in welcher Phase und in welchen Mengen die fluiden Medien die Rohrleitungen durchströmen.

Die Verfahren der Erdöl- und Erdgasgewinnung werden auch als geeignet beurteilt, um nach entsprechender Anpassung in Zukunft für die Gewinnung fester mineralischer Rohstoffe eingesetzt zu werden, d. h. ohne den direkten Einsatz des Menschen unter Tage. Hierzu ist es allerdings erforderlich, diese Lagerstätten vorher von der festen in die flüssige oder gasförmige Phase zu überführen. Dies kann durch *Auslaugen*, *Vergasen* oder durch anderweitig geeignete Extraktionsverfahren erfolgen (vgl. 1.3.3.). In bestimmten Fällen sind auch *thermische Einwirkungen* sowie die künstliche Schaffung von Fließwegen erforderlich, um die bei Anwendung derartiger Verfahren unbedingt erforderlichen Voraussetzungen für die Durchströmung der zu gewinnenden Lagerstätten schaffen zu können.

1.4.1. Entstehung von Erdöl und Erdgas, wichtigste Lagerstättentypen

Erdöl und Erdgas werden in porösen und klüftig-porösen Schichten sedimentärer Entstehung vieler geologischer Formationen angetroffen, sofern die allgemeinen Bedingungen zur Bildung und Erhaltung flüssiger und gasförmiger Kohlenwasserstoffe gegeben waren. Die größten und ergiebigsten Lagerstätten wurden bisher im Tertiär und im Mesozoikum angetroffen. Es gibt heute kaum noch einen Zweifel, daß Erdöl und Erdgas aus organischen Substanzen entstanden sind, womit nicht völlig auszuschließen ist, daß unter bestimmten Bedingungen auch auf anorganischem Wege Kohlenwasserstoffe in wirtschaftlich unbedeutenden Mengen entstehen können. Für die Bildung abbauwürdiger Lagerstätten wird jedenfalls eine anorganische Entstehung ausgeschlossen. Als geeignete Bildungsräume für Kohlenwasserstoffe werden Meere angesehen, deren Untergrund langsamen Senkungen, später teilweise auch wieder Hebungen unterworfen war. Die absterbende und sich auf dem Meeresgrund ablagernde organische Substanz von *Plankton* und *Benthos* konnte in zahlreichen mehr oder weniger abgeschlossenen Meeresteilen, in strömungsfreien Vertiefungen usw. nicht verwesen und sich zusammen mit tonigen Sedimenten als *Faulschlamm* anreichern. Gegenwärtig sind im Schwarzen Meer noch solche Vorgänge nachweisbar. Mit zunehmender Verfestigung der Sedimente entwickelte

sich ein sog. *Erdölmuttergestein*, in dem Öl und Gas in feinverteilter, disperser Form angereichert sind. Infolge weiteren Absinkens, verbunden mit sich überlagernden Sedimenten, sowie durch Einwirkung gebirgsbildender Vorgänge können in geologischen Zeiträumen die Öl- und Gasmengen aus dem Muttergestein herausgepreßt und durch eine großräumige und langzeitliche Wasserströmung in großporige Gesteine, wie Sande, Sandsteine, poröse Kalksteine usw., transportiert werden. Dieser Vorgang wird auch als *Migration* bezeichnet. Innerhalb dieser Speichergesteine kommt es in vielen Fällen zu einer Differenzierung dieser migrierten Substanzen, wobei entsprechend ihrer unterschiedlichen Dichte von unten nach oben Wasser, Öl und Gas sich mehr oder weniger scharf voneinander trennen. Am eindeutigsten erfolgt diese Trennung, wenn die Speicherschichten eine leichte Aufwölbung besitzen. Dabei ist immer Voraussetzung, daß im Hangenden der Speichergesteine ebenso wie an ihren Rändern Schichten mit hinreichender Undurchlässigkeit für Öl und Gas anstehen. Da solche abdichtenden Schichten der weiteren Migration der Kohlenwasserstoffe entgegenwirken, werden die porösen Schichten, in denen die endgültige Anreicherung der migrierten Substanzen erfolgt, häufig auch als *Fallen* bezeichnet.

Lagerstättentypen. *Stratigrafische Fallen* sind grundsätzlich solche Migrationsräume, die einen besser durchlässigen Porenraum als die in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft anstehenden Gesteine besitzen.

Antiklinalfallen (Abb. 1.4.1-1) sind Lagerstätten mit einer Aufwölbung der Speicherschicht einschließlich der Begleitschichten im Hangenden und im Liegenden des Speichers. Sie sind gewissermaßen die klassische Ausbildungsform einer Erdöllagerstätte, und ihr Abbau läßt sich besonders günstig nach den geltenden Grundregeln der Erdölgewinnung verwirklichen.

Diskordanzfallen (Abb. 1.4.1-2) entstehen dann, wenn durch tektonische Vorgänge eine bestimmte Schichtenfolge schräg gestellt wird, wobei der obere Teil abgetragen und durch eine neue abdichtende Sedimentationsfolge überlagert wird.

Salzstockfallen (Abb. 1.4.1-3) entstehen, wenn unter Speichergesteinen Salzschichten größerer Mächtigkeit anstehen, die unter Einfluß tektonischer Kräfte zu einem sog. Salzstock domartig aufgewölbt werden und sich dabei die an den Flanken des Salzstocks mit aufgewölbten Speicherschichten als Erdöllagerstätten herausbilden.

In der Natur gibt es zahlreiche Varianten dieser Grundtypen. Besonders schwierig gestalten sich Erkundung und Gewinnung solcher Lagerstätten, die durch tektonische Kräfte, durch Brüche, Verwerfungen usw. in zahlreiche kleine Einzelstrukturen mit unterschiedlicher Ölführung und Ergiebigkeit zergliedert werden, wie dies in

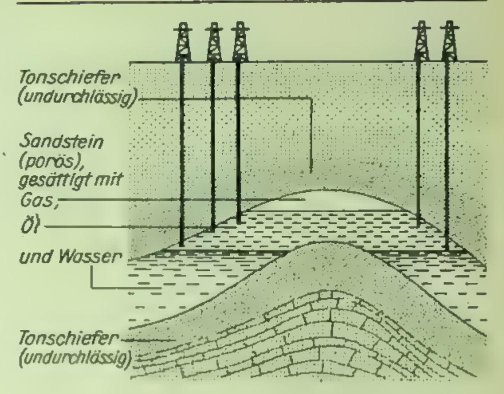


Abb. 1.4.1-1 *Schema einer Antiklinalfalle*

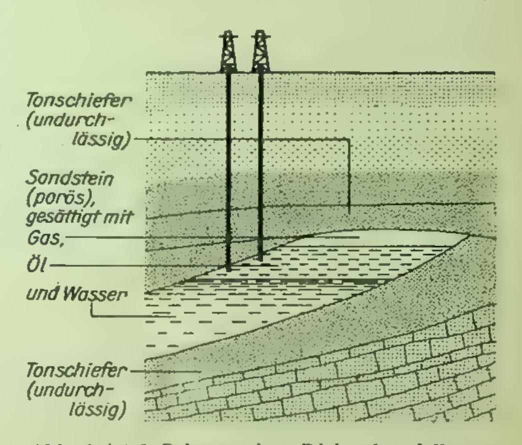


Abb. 1.4.1-2 *Schema einer Diskordanzfalle*

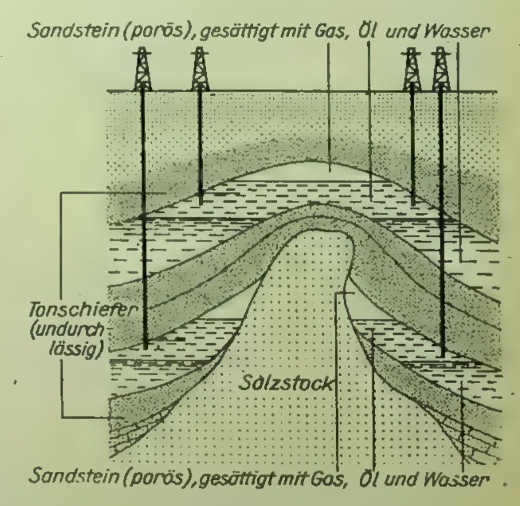


Abb. 1.4.1-3 *Schema einer Salzstockfalle*

Mitteleuropa bei Lagerstätten des Zechsteins relativ häufig vorkommt.
Für eine Reihe von Erdgaslagerstätten gibt es eine spezielle Entstehungstheorie, die vor allem für die Rotliegendlagerstätten, die sich in West-Ost-Richtung von Holland über die BRD, die DDR bis nach Polen erstrecken, als zutreffend angesehen wird. Hiernach wurden Steinkohlen mit zunächst geringem Inkohlungsgrad durch gebirgsbildende Vorgänge in größere Tiefen abgesenkt. Dabei kommt unter höheren Temperaturen ein erneuter *Inkohlungsprozeß* zustande und damit die Bildung von größeren Mengen an Methan. Diese migrieren in höhere Schichten mit hinreichend großer Porosität – also z. B. vom Oberkarbon ins Rotliegende –, wobei sich Lagerstätten beträchtlichen Ausmaßes bilden können.

1.4.2. Eigenschaften der Speichergesteine

Speichergesteine sind poröse, klüftige oder klüftig-poröse Gesteine. Sie sind meist als Sandsteine, Kalksteine oder Dolomite ausgebildet. Erdöl kann jedoch auch in unverfestigten Sanden und in bituminösen Schiefern vorkommen. Speichergesteine sind hinsichtlich ihrer den Lagerstättenabbau maßgeblich bestimmenden Eigenschaften durch verschiedene Kriterien und Parameter gekennzeichnet.
Die *Porosität* ist der Anteil der in einem Gestein enthaltenen Hohlräume; sie wird in Volumenprozenten ausgedrückt. Die Größe der einzelnen Poren bewegt sich bei den verschiedenen Gesteinen in weiten Grenzen, von den kleinsten Kapillaren bis zu großen Kavernen. Für die Gewinnung von Erdöl und Erdgas sind zunächst nur solche Poren von Interesse, die untereinander durch mehr oder weniger feine Kanäle in Verbindung stehen und dabei groß genug sind, um die in ihnen befindliche Lagerstättensubstanz bei Zustandekommen eines Druckgefälles freizugeben. Es gibt Gesteine mit einer bemerkenswert großen Gesamtporosität, z. B. Tongesteine, bei denen die Poren jedoch so klein sind, daß durch Kapillarkräfte auch bei vorhandenen Fließwegen und dem grundsätzlich erforderlichen Druckgefälle keine Strömungsbewegung der in ihnen enthaltenen Kohlenwasserstoffe zustande kommt. Die absolute Porosität ist ein Maß für das Gesamtvolumen der in einem Gestein enthaltenen Hohlräume, während die effektive oder *Nutzporosität* den Anteil des *Gesamtporenvolumens* darstellt, der beim praktischen Lagerstättenabbau genutzt werden kann. Sowohl die Gesamtporosität als auch die Nutzporosität werden entscheidend von der Korngrößenverteilung des Speichergesteins und auch von der Art des Bindemittels bestimmt.
Die *Permeabilität* ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines Gesteins für Flüssigkeiten und Gase. Nur poröse oder klüftige Gesteine können permeabel sein, wobei allerdings kein zahlenmäßiger Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität bestehen muß.
Die *Elastizität* der Speichergesteine ist im hier vorliegenden speziellen Falle durch die Eigenschaft der Gesteine gekennzeichnet, ihr Volumen und demzufolge auch ihre Porosität in Abhängigkeit von dem auf die Gesteine wirkenden Druck zu ändern. Die Beherrschung der Gesteinselastizität gehört gegenwärtig noch zu den kompliziertesten Aufgaben bei der Projektierung und dem Abbau von Kohlenwasserstofflagerstätten, weil einerseits die Gesteine inhomogene und anisotrope feste Körper sind und weil andererseits die im *Gesteinsgerüst* sich beim Lagerstättenabbau vollziehenden Vorgänge teilweise auch von inelastischen Erscheinungen begleitet werden, die mathematisch noch weitaus schwieriger zu erfassen sind als die sich in elastischen Bereichen vollziehenden. Die elastischen bzw. Kompaktionseigenschaften der Speichergesteine und auch die des überlagernden Deckgebirges sind von großer Bedeutung für das Verhalten des Speichergesteins beim Lagerstättenabbau selbst (vgl. 1.4.4.).

1.4.3. Die Eigenschaften von Erdöl und Erdgas unter den Bedingungen ihrer natürlichen Ablagerung

Phasenzustand. In den meisten Fällen befinden sich Erdöl und Erdgas in ihren Lagerstätten unter wesentlich höheren Drücken und Temperaturen als nach der Förderung über Tage. Das in der Lagerstätte enthaltene Erdöl bildet ein Gemisch von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen, in dem sich teilweise noch Randwasser aus der Peripherie der Lagerstätte oder aus Bereichen unterhalb der ölführenden Speicherschichten befindet. Gasgehalt, Druck und Temperatur in der Lagerstätte bestimmen wesentlich den *Phasenzustand*, d. h. die jeweiligen Anteile von Gas und Flüssigkeit. In Abhängigkeit von Druck und Temperatur sind diese Anteile starken Änderungen unterworfen, weil sich unter Umständen über 100 Normkubikmeter Gas in 1 m^3 Erdöl lösen können. Da die Anteile an Gas und Öl die Phasenpermeabilität sehr stark beeinflussen, müssen die Löslichkeitseigenschaften im Laboratorium bestimmt werden. Dazu werden sog. Tiefenproben unter Lagerstättendruck und -temperatur aus dem Bohrloch entnommen und in Autoklaven untersucht. Besonders wichtig ist die Messung des *Sättigungsdrucks* des Erdöls, bei dem eine max. Gasmenge im Erdöl gelöst ist. Das Verhältnis von gelöster Gasmenge in Öl bei normalem Druck bezeichnet man als *Lösungsgasölverhältnis*.

Viskosität ist die für das Fließverhalten des Erdölgemischs bestimmende Größe. Sie wird nicht in erster Linie vom Druck, sondern vielmehr von der Temperatur und dem Anteil des gelösten Gases bestimmt.
Die Eigenschaften des Wassers in und am Rande sowie unterhalb der ölführenden Schichten sind ebenfalls von Wichtigkeit. In den meisten Lagerstätten haftet Wasser an den Porenwänden; es bleibt auch bei der Entölung des Speichergesteins als Film an den Gesteinskörnern haften, ist also unbeweglich. Sogenanntes freies Schichtwasser, das angetroffen wird, wenn die Schicht nicht voll mit Öl oder Gas gesättigt ist und das vom Rande der Lagerstätte stammen kann, fließt ebenfalls durch das Speichergestein. Da es in vielen Fällen trotz höherer Dichte eine niedrigere Viskosität als das Erdöl besitzt, fließt es mit geringeren Widerständen dem Bohrloch zu und muß mit gefördert werden. Daher sind die Viskosität des Wassers und seine Grenzflächenspannung von Bedeutung für die Fließeigenschaften und für die Benetzung der Speichergesteine sowie für den verbleibenden *Haftwasseranteil*.

1.4.4. Lagerstättenparameter und Projektierung des Lagerstättenabbaus

Lagerstättenparameter. Nachdem durch Such- und Erkundungsbohrungen (vgl. 1.1.2.), kombiniert mit geophysikalischen Bohrlochmessungen, die Abbauwürdigkeit einer Lagerstätte nachgewiesen wurde, besteht die nächste Aufgabe darin, durch weitere Bohrungen die flächenhafte Ausdehnung der Lagerstätte festzustellen und Informationen für den zu projektierenden Abbau zu liefern. Man bedient sich hierfür prinzipiell der gleichen Bohr- und geophysikalischen Meßmethoden wie bei den Such- und Erkundungsarbeiten (vgl. 1.1.). Ein *optimaler Lagerstättenabbau* wird dann erzielt, wenn die Produktion frühzeitig aufgenommen wird. Durch Messungen während dieser „industriellen Probeförderung" müssen gemeinsam mit den genannten Meßmethoden die wichtigsten Lagerstättenparameter festgestellt werden.
Porosität und Permeabilität der Speichergesteine (vgl. 1.4.2.) müssen in der horizontalen und vertikalen Erstreckung der Lagerstätte ermittelt werden. Bei *Kluftlagerstätten* sind auch *Kluftrichtung, -verteilung* und *-breiten* festzustellen.
Geomechanisches Verhalten der Speichergesteine und des Deckgebirges. Hierbei sind die *Kompaktionseigenschaften* von besonderer Wichtigkeit (vgl. 1.4.2.). Sie ermöglichen Aussagen darüber, ob und in welchem Umfang sich das Speichergestein und die Deckschichten mit zunehmender Druckentlastung der Lagerstätte absenken. Hierdurch kann einerseits eine ernsthafte Verringerung der Poren- und Klufträume und damit eine Verschlechterung der Fließwege eintreten, andererseits können bis über Tage wirksam werdende Absenkungen Schäden an Übertagebauten, an unterirdisch verlegten Rohrleitungen und Kabeln verursachen. Durch Ansteigen des Grundwasserstands kann es zu Versumpfungen und zur Schädigung von kultivierten Flächen kommen.
Temperatur und Druck, unter denen sich die fluiden Medien befinden, beeinflussen maßgeblich die Abbaustrategie der Lagerstätte (s. u.).
Zusammensetzung der fluiden Medien in der Lagerstätte. Die Anteile von Öl, Gas, Wasser und Begleitkomponenten bestimmen wesentlich die Fördertechnologie. Bei Vorhandensein korrosiver Komponenten müssen die Fördersonden mit besonderen Ausrüstungen und speziellen Werkstoffen ausgestattet werden (vgl. 1.4.5.).
Die Kenntnis der *Benetzungseigenschaften des Speichergesteins* und der *Oberflächenkräfte der fluiden Medien* gestatten Aussagen über die zu projektierenden Maßnahmen zur Maximierung des Ausbeutefaktors der Lagerstätte.
Die *Wärmeleitfähigkeit des Speichergesteins* ermöglicht Aussagen über Temperaturänderungen während des Gewinnungsprozesses.
Für die Beurteilung der Abbauwürdigkeit einer Lagerstätte, der zu erwartenden Gewinnungskosten und der zu projektierenden Abbautechnologie sind wichtig:
– Mächtigkeit und flächenmäßige Ausdehnung,
– Anzahl der untereinander liegenden produktiven Horizonte, d. h. der Schichten, aus denen Erdöl oder Erdgas wirtschaftlich gewinnbar ist,
– Mächtigkeit der nichtproduktiven Zwischenschichten,
– Ablagerungsverhältnisse, Struktur, vorhandene Störungen, Verwerfungen usw.

Projektierung des Lagerstättenabbaus. Die Projektierung des Lagerstättenabbaus erfolgt in der Regel durch Anwendung der *Modelltechnik*, d. h. durch numerische oder elektrische Analogiemodelle, wobei im Zuge des Abbaus die Modelle ständig zu präzisieren sind. Die Lagerstätteneigenschaften werden mit fortschreitendem Abbau der Lagerstätte zunehmend besser bekannt.
Für die Projektierung des Lagerstättenabbaus gelten folgende Zielstellungen:
– max. Ausbeute, d. h. Gewinnung mit möglichst kleinen Abbauverlusten,
– Gewinnung mit möglichst geringen Produktionskosten,
– Gewinnung eines möglichst großen Anteils der Lagerstättensubstanz durch Eruptivförderung, d. h. unter Nutzung des in der Lagerstätte gespeicherten Energieinhalts in Form des vorhandenen Gasdrucks.
Diese Forderungen widersprechen scheinbar teilweise einander. Daher ist es Aufgabe der Pro-

jektierung und der Abbaustrategie, eine optimale Gesamtlösung zu suchen. In der Regel entstehen in der ersten Phase des Lagerstättenabbaus, solange noch Eruptivförderung betrieben werden kann, die geringsten Förderkosten. Sobald die Förderung mit Fremdenergie erfolgen muß, erhöhen sich die Kosten. Eine weitere Kostenerhöhung tritt durch die Anwendung aktiver Druckerhaltungsmaßnahmen und durch Maßnahmen zur Erhöhung des Ausbeutefaktors ein.

1.4.5. Die Installation von Fördersonden

Die Ausrüstung einer Bohrung als Fördersonde erfolgt nach den Grundsätzen der Bohrtechnik. Bohrlochkonstruktion und Zementation der Ringräume werden durch die gegebenen geologisch-geomechanischen und hydrologischen Bedingungen bestimmt. In den meisten Fällen wird vorerst auch die durchbohrte Speicherschicht mit verrohrt und zementiert.

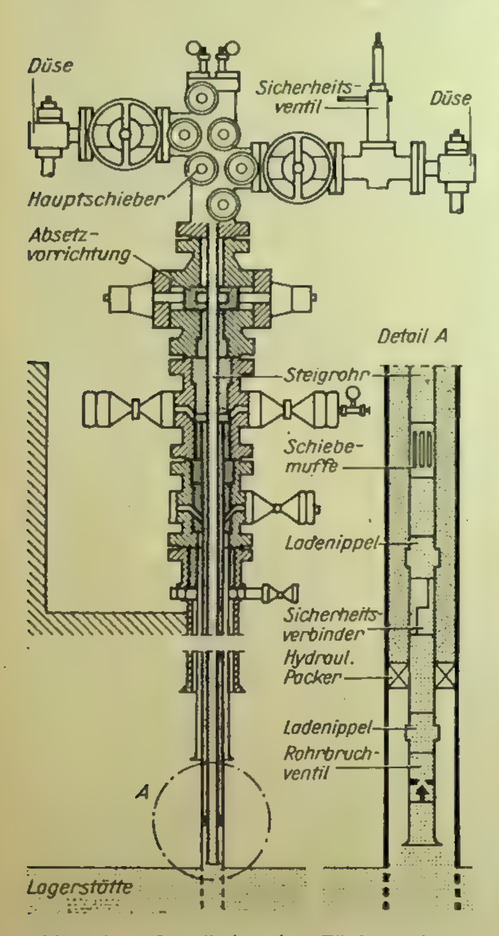


Abb. 1.4.5-1 Installation einer Fördersonde

Aufbau der Fördersonde. Nach Fertigstellung der Bohrung wird die Speicherschicht wieder geöffnet, indem die Verrohrung durch *Schuß-* oder *Erosionsperforation* durchlöchert wird, um die fluiden Medien in die innerste Rohrtour, die sog. *Produktionsrohrtour*, einfließen zu lassen. Bei niedrigen Lagerstättendrücken und nichtkorrosiven Fördermedien kann die Förderung durch die einzementierte Produktionsrohrtour erfolgen. Bei Hochdrucklagerstätten und bei Anwesenheit korrosiver Begleitkomponenten in den Fördermedien, z. B. Schwefelwasserstoff H_2S, Quecksilber oder auch Salzlaugen, wird in die Produktionsrohrtour ein auswechselbarer *Steigrohrstrang* eingebaut und durch eine Pakkerkonstruktion in der Produktionsrohrtour verankert (Abb. 1.4.5-1). *Packer* sind Abdichtelemente, die durch Spezialmechanismen dicht und fest mit der Innenwand der nächstfolgenden Rohrtour verbunden werden können. Bei Korrosionserscheinungen an den Steigrohren muß die Fördersonde vorübergehend totgepumpt werden, d. h., sie wird mit einer Flüssigkeit mit solcher Dichte angefüllt, daß ein ausreichender Gegendruck gegen den Lagerstättendruck gewonnen und auf diese Weise vermieden wird, daß die Lagerstätte unkontrolliert eruptieren kann. Im totgepumpten Zustand kann dann nach Lösen bzw. Auffräsen der Packerkonstruktion die schadhafte Steigrohrtour ausgewechselt werden; die Sonde wird wieder freigefördert, und die Förderarbeiten können fortgesetzt werden. Die Dimensionierung des Steigrohrstrangs hinsichtlich Durchmesser, Wanddicke und Werkstoffgüte erfolgt aufgrund der geplanten Förderleistungen, des anstehenden Drucks und der Temperatur sowie der zu erwartenden Beanspruchungen durch korrosive Begleitkomponenten. Auch mitgerissener Sand kann durch Erosion eine unerwünschte Beanspruchung des Steigrohrstrangs hervorrufen.

Das *Eruptionskreuz* bildet den übertägigen Abschluß einer Fördersonde. Es besteht aus einer Anzahl durch Flansche miteinander verbundener Abschlußarmaturen, in der Regel als Schieber ausgebildet, und den erforderlichen Reservearmaturen. Bestandteile des Eruptionskreuzes sind ferner Manometer, Thermometer und besonders die *Druckregeleinrichtung*, die die Fördermenge der Sonde steuert, meist in Abhängigkeit vom Druck in der nachfolgenden Leitung innerhalb einer vorgegebenen Toleranz. Ziel der Förderarbeiten ist jedoch stets, eine optimale Förderrate zu fahren. Bei Erdölsonden versteht man darunter in der Regel die Fördermenge, bei der ein minimales Verhältnis von mitgefördertem Gas- zu gefördertem Ölvolumen auftritt (minimales Gas-Öl-Verhältnis). Bei Erdgassonden beinhaltet der Begriff „*optimale Förderrate*" die maximale Menge, bei der in der Lagerstätte und

in der Sonde noch keine schädlichen Effekte, wie Wasserdurchbruch zur Sonde, Sandaustrag, Erosion, auftreten.
Die optimale Förderrate wird aufgrund von Ergebnissen eines vorangegangenen Produktionstests bestimmt und im Verlaufe der Gewinnungsarbeiten bedarfsweise korrigiert.

1.4.6. Die Förderverfahren

An der Änderung des Gas-Öl-Verhältnisses (Zunahme des Gasanteils) und am Absinken des Lagerstättendrucks erkennt man den spätesten Zeitpunkt zur Anwendung von Maßnahmen zur Druckerhaltung in der Lagerstätte (vgl. 1.4.7.). Reicht der Lagerstättendruck nicht mehr zur Eruptivförderung aus, so muß der weitere Abbau durch verschiedene Fördermittel erfolgen.
Tiefpumpen (Abb. 1.4.6-1) sind besonders auf alten Erdölfeldern weit verbreitet. Sie werden heute durch elektrischen Einzelantrieb angetrieben und können ihre Fördermenge in weiten Grenzen variieren. Vom Arbeitsprinzip her gehören sie zu den Tauchkolbenpumpen (vgl. 2.6.6.).
Tauchkreiselpumpen arbeiten mit elektrischem Antrieb, wobei sich der vertikal stehende Elektromotor unterhalb des Flüssigkeitsspiegels befindet. Diese Pumpen müssen mit etwa konstanter Leistung gefahren werden.
Gasliftverfahren. Bei diesem Verfahren wird Gas in die Steigleitung eingeführt und die Flüssigkeitssäule dadurch nach oben gefördert (Abb. 1.4.6-2).
Besonders günstig ist seine Anwendung, wenn sich in der Nähe des Erdölfelds eine Gaslagerstätte befindet, von der das zu verwendende Gas bezogen werden kann.
Unter *intermittierender Förderung* versteht man eine nur zeitweilige Fördertätigkeit. Sie wird dann angewendet, wenn der Zufluß aus der Lagerstätte zur Fördersonde geringer geworden

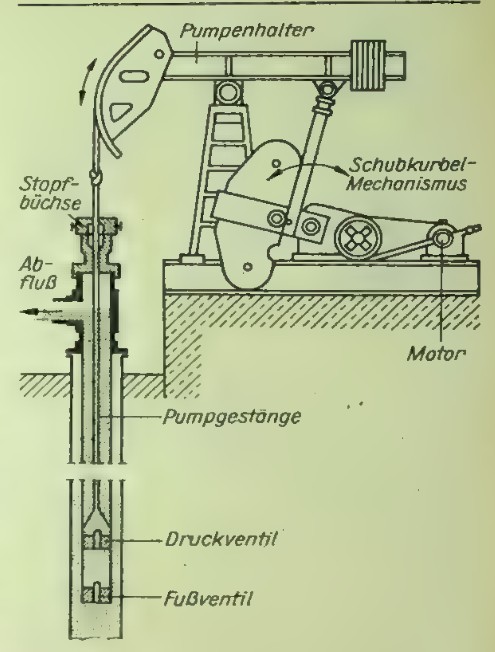


***Abb. 1.4.6-1** Erdölförderung mit einer Tiefpumpe*

ist als die geringste Leistung des gewählten Fördermittels. Als Zeitabstände zwischen 2 Förderperioden können Zeiten von einer Woche und mehr erforderlich werden. Auf diese Weise gibt es Fördersonden, die mehrere Jahrzehnte in Betrieb bleiben, wobei allerdings gleichzeitig die Grenzen der Wirtschaftlichkeit erreicht werden, weil in solchen Sonden der Anteil des Erdöls an der Fördermenge nur noch wenige Prozent beträgt und das mitgeförderte Wasser zweckmäßig

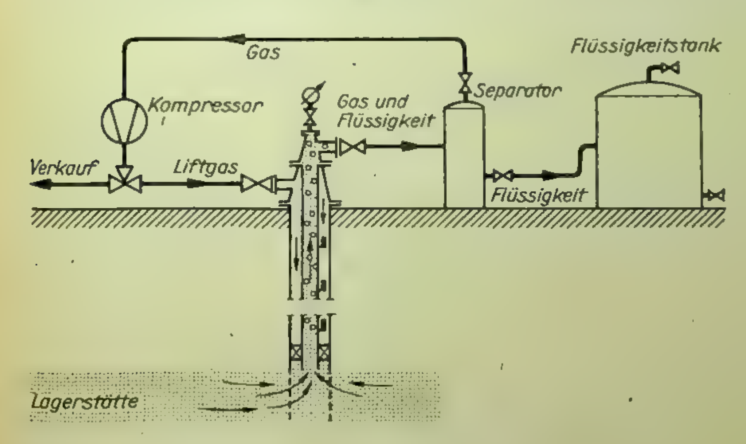


***Abb. 1.4.6-2** Erdölförderung nach dem Gasliftverfahren*

wieder in permeable Schichten verpreßt werden muß, um die Verschmutzung von Oberflächengewässern zu vermeiden.
Die *Förderung aus Meereslagerstätten* (Tafel 4) erfolgt bis zum Bohrlochkopf prinzipiell mit den gleichen Verfahren wie bei Lagerstätten auf dem Festland. Allerdings kommt Tiefpumpförderung nur bei geringen Wassertiefen zur Anwendung. Weitaus komplizierter sind hingegen die Sondenkopfarmaturen, sofern sie nicht oberhalb des Meeresspiegels montiert werden können. Besondere konstruktive Entwicklungen waren auch für den untermeerischen Transport von Erdöl und Erdgas sowie für die Schaffung von Zwischenspeichern erforderlich, vor allem, wenn der Abtransport diskontinuierlich durch Tanker erfolgen muß. Die *Zwischenspeicher* sind sehr unterschiedlich ausgebildet. Sie können sowohl als zylinderförmige, senkrecht auf dem Meeresboden und mit der Förderplattform verbundene Stahlbetonbehälter ausgebildet sein oder auch als von der Plattform unabhängige trichterförmige oder kastenartige Speicher aus Stahl auf dem Meeresboden abgesetzt und verankert sein. In der Regel erfolgt das Befüllen und Entleeren der Behälter durch Austausch und Verdrängung mit Meereswasser.

1.4.7. Lagerstättenbehandlung

Zur Lagerstättenbehandlung zählen Maßnahmen, die der Druckerhaltung in der Lagerstätte und der Verbesserung der Fließbedingungen in bohrlochnahen und in weiteren Lagerstättenbereichen dienen. Maßnahmen also, die den Ausbeutekoeffizienten erhöhen und damit die Abbauverluste minimieren. Die Anwendung einer bestimmten Maßnahme ist von den spezifischen Lagerstättenbedingungen abhängig.
Druckerhaltung in der Lagerstätte. *Wasserfluten.* Über sog. *Einpreßsonden* an den Lagerstättengrenzen wird Wasser eingepreßt, das z. T. zuvor erst vom Förderstrom abgetrennt wurde. Die notwendigen zusätzlichen Wassermengen müssen aufbereitet werden, um Schädigungen der Lagerstätte zu vermeiden. Anstelle von Wasser können auch Wasserdampf, Propan oder Kohlendioxid eingepreßt werden. Bei Dampfeinpressung wird durch die Temperaturerhöhung des Erdöls gleichzeitig die Viskosität verringert und die Fließfähigkeit somit verbessert. Propan und CO_2 gehen im Öl in Lösung, verbessern damit ebenfalls die Fließfähigkeit und wirken durch ihren Überdruck gleichzeitig als Treibmittel bei der Überwindung der Strömungswiderstände.
Beim *Gaseinpressen* wird das vom geförderten Erdöl getrennte und auch von außerhalb herangeführte Gas in die Gaskappe der Lagerstätte eingepreßt und so der bei der Erdölgewinnung eintretende Druckabfall kompensiert.
In geeigneten Fällen können Wasserfluten und Gaseinpressen auch gleichzeitig durchgeführt werden, und zwar möglichst gleich mit Beginn des Lagerstättenabbaus. Hierfür ist jedoch notwendig, daß man den Umfang und die spezifischen Eigenschaften der Lagerstätte hinreichend genau kennt.
Verbesserung der Fließbedingungen. *Säuerungsmaßnahmen.* Hierbei wird verdünnte Salzsäure eingepumpt, die kalkige Bestandteile aus dem Gesteinsskelett herauslöst und damit die Fließwege erweitert. Bei stärkerem Anteil an silikatischen Bestandteilen kann zur Salzsäure auch eine Zugabe von Fluorwasserstoffsäure erfolgen.
Fracbehandlungen. Durch *hydraulisches Aufbrechen* der Schichten und Einpumpen von *Stützmaterialien*, in erster Linie von Quarzkörnern, Glas- oder auch Aluminiumkugeln sowie von gesinterten Bauxitkugeln von 1 bis 2 mm Durchmesser, werden die hergestellten Klüfte offen gehalten. Auch Nußschalen eignen sich nach entsprechender Aufmahlung als Stützmedien. Neuerdings wird dazu übergegangen, granulierte Kunststoffe hierfür zu benutzen. Wichtig für die Auswahl im Interesse einer guten Transportierfähigkeit ist eine möglichst geringe Masse und eine hohe Festigkeit, die dem Bestreben des aufgerissenen Gebirges, die entstandenen Klüfte wieder zu schließen, ausreichenden Widerstand entgegensetzt.
Als Fracflüssigkeiten werden entweder öl-wasser- oder säure-basische Medien gewählt. Sie dürfen mit dem Speichergestein und mit dem Lagerstätteninhalt keine chemischen Reaktionen eingehen, müssen gut fließfähig sein und die oben genannten Stützmedien über möglichst große Entfernungen transportieren können. Gegenwärtig werden für den weiteren Ausbau dieser für die intensivierte Kohlenwasserstoffgewinnung ungemein wichtigen Technologie umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. In zunehmendem Umfange werden diese Maßnahmen auch für Rißbildungen in größeren Entfernungen von den Fördersonden benutzt. Risse von über 1000 m Länge lassen sich auf diese Weise herstellen. Allerdings gibt es gegenwärtig noch kein zuverlässiges Verfahren, um die Richtung der so entstehenden Risse und Spalten hinreichend genau vorauszubestimmen. Die über größere Entfernungen wirksamen Fracmaßnahmen sind gleichzeitig geeignet, den Ausbeutekoeffizienten der Lagerstätte zu erhöhen. Eine intensivierte Wirkung dieser Maßnahme wird dann erzielt, wenn man nach Herstellung der Risse flüssigen Sprengstoff einpumpt und diesen zur Detonation bringt. Hierdurch werden umfangreiche neue Kluftsysteme geschaffen. Schließlich können größere Auflockerungserscheinungen, verbunden mit Rißbildungen, durch *unterirdische Atomsprengungen*

hervorgerufen werden. Derartige Maßnahmen, die bisher vorwiegend von der UdSSR und den USA durchgeführt wurden, befinden sich gegenwärtig noch im Versuchsstadium, wobei die Beseitigung bzw. Verdünnung anfallender radioaktiver Rückstände und die Beherrschung der über Tage wirksam werdenden Erschütterungen gegenwärtig noch die Hauptprobleme bis zur industriellen Anwendungsreife bilden.

Bei der *in-situ-Verbrennung* wird durch Einpressen von Luft und durch unterirdische Zündung des Lagerstättenöls eine unterirdische Feuerfront geschaffen, die ebenfalls die Temperatur im Speicher erhöht und das vor der heißen Front befindliche nun besser fließfähige Öl der Fördersonde zutreibt. Allerdings ist zur Durchführung dieses Verfahrens auch eine vorherige Auflockerung, verbunden mit verbesserten Fließbedingungen im Speichergestein, unbedingt erforderlich.

Weniger vielfältig sind die Verfahren zur erhöhten Ausbeute von Erdgaslagerstätten. Dies hat seine Ursache in erster Linie darin, daß Erdgas eine hundertfach bessere Fließfähigkeit besitzt als Erdöl. Dennoch gibt es in verschiedenen Ländern ebenfalls große Erdgaslagerstätten bzw. Lagerstättenteile, die nur durch eine entscheidende Verbesserung der Fließbedingungen wirtschaftlich gewinnbar sind. Hierfür kommen in erster Linie Fracbehandlungen mit weitreichender Wirkung oder Auflockerungen durch unterirdische Atomsprengungen in Betracht. Im Hinblick auf die steigenden Preise für flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe und der in Aussicht stehenden Verknappung ihrer Vorräte werden gegenwärtig in vielen Ländern umfangreiche Forschungsarbeiten zur Erhöhung des Ausbeutekoeffizienten in bereits abgebauten und in gegenwärtig noch im Abbau befindlichen Lagerstätten durchgeführt.

1.4.8. Instandhaltung der Förderwege

Nur bei sehr günstig ausgebildeten Lagerstätten kann über längere Zeit mit einem ungestörten und kontinuierlichen Förderprozeß gerechnet werden. In zahlreichen Lagerstätten kommt es zu Korrosionserscheinungen durch korrosive Begleitkomponenten (vgl. 1.4.5.). Korrosion kann insoweit beherrscht werden, daß durch Einsatz geeigneter Werkstoffe und auch durch prophylaktische Reparaturen Störungen größeren Ausmaßes vermieden werden. Durch Einbau geeigneter Filter und durch eine partielle chemische Verfestigung des bohrlochnahen Raums, jedoch unter Beibehaltung einer hinreichenden Durchlässigkeit, kann das Mitfördern größerer Sandmengen vor allem bei der Erdgasgewinnung vermieden werden.

In vielen Lagerstätten wird während der Erdölförderung Paraffin an den Wänden der Steigrohrstränge ausgeschieden, wodurch die freien Rohrquerschnitte beträchtlich verringert werden können. Die Behebung dieser Erscheinung kann durch kontinuierliches, mechanisches Abschieben der Rohrwände erfolgen. Das Einpressen von Dampf oder von heißem Erdöl sind ebenfalls Möglichkeiten zur Beseitigung des Paraffins. Schwieriger ist es allerdings, wenn an den Steigrohrwänden Salz oder Karbonate auskristallisieren. Eine mechanische, physikalische oder chemische Beseitigung derartiger Ansätze ist bisher noch nicht gelungen, so daß vorerst das Auswechseln der Steigrohrstränge die einzige Möglichkeit bildet, den Förderprozeß aufrechtzuerhalten.

Bei der Erdgasgewinnung kann es leicht zur Bildung von Hydraten kommen. *Hydrate* sind Verbindungen von Kohlenwasserstoffmolekülen mit Wasser, die in fester Form bei bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen entstehen und zu Verstopfungen führen können. Bevorzugt bilden sich Hydrate bei hohen Drücken und bei relativ niedrigen Temperaturen. Zur Vermeidung derartiger Erscheinungen wird in dosierten Mengen *Methanol* in den Förderstrom gegeben. Im übertägigen Förderstrom wird der Hydratbildung vor allem durch möglichst vollständige Absonderung des Wassers und des Wasserdampfs aus dem geförderten Gas entgegengewirkt.

1.5. Mariner Bergbau

In Abgrenzung zum Bergbau auf dem Festland, der seit Jahrtausenden betrieben wird, bezeichnet man den erst in diesem Jahrhundert be-

Tab. 1.5.0-1 *Rohstoffe und Lagerstätten des marinen Bergbaus (Küstenbereiche)*

Rohstoffe	Lagerstätte
Titanomagnetitsand	Ariake-Bucht (Japan), Ochotskisches Meer, Philippinen
Eisenmanganoxide und Buntmetallsulfide	Pazifik, Atlantik
Sulfidschlamm	Atlantis-II-Tiefe, Rotes Meer
Kassiterit	Indonesien, Malaysia, Thailand, England
Ilmenit, Rutil, Zirkon	Australien, Neuseeland, USA, Indien, Sri Lanka
Diamanten	Namibia, Südafrika
Gold, Platin	USA
Bernstein	Südafrika, Ostseeküste
Monazit, Ilmenit	Brasilien, Australien, Ägypten, Indien
Phosphorit	USA
Schwefel	USA
Kies und Sand	weltweit in Küstengebieten
Muschelschalen	USA

gonnenen Abbau von mineralischen Rohstoffen vom Grund der Weltmeere und in den Küstenbereichen (Tab. 1.5.0-1) als marinen Bergbau. Erst seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 beschäftigt man sich spürbar mit der Erkundung von Meereslagerstätten, mit der Entwicklung von speziellen Ausrüstungen für die Gewinnung und den Transport auf dem Meer und mit den technologischen Besonderheiten des Abbaus. Pionierleistungen wurden dabei durch die Erdölindustrie beim Abbau von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen im Schelfbereich vollbracht. Die weltweite Verknappung verschiedener Rohstoffe auf dem Festland und die wachsenden Selbstkosten beim Abbau unter geologisch ungünstiger werdenden Bedingungen bzw. in noch unerschlossenen Regionen machen den marinen Bergbau für die Zukunft wirtschaftlich immer interessanter. Dazu kommt das wachsende wissenschaftlich-technische Potential in den industrialisierten Ländern, das für die Gewinnung von Rohstoffen aus Lagerstätten mit bis zu 6000 m Wasserüberdeckung erforderlich ist.

1.5.1. Vorkommen

1872 wurden als Zufallsfunde aus dem Pazifik mit Schleppnetzen des Dreimastseglers „Challenger" die ersten *Manganknollen* gehoben. Weitere Funde führten bis zum Anfang unseres Jahrhunderts zu der Erkenntnis, daß in bestimmten Gebieten eine dichte Bedeckung des Meeresbodens mit Manganknollen vorhanden ist. Im letzten Jahrzehnt sind diese Manganknollen-Lagerstätten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erkundet worden. Sie gelten als die reichsten Vorkommen im Meer, auf die sich das Interesse konzentriert und deren Nutzung bereits begonnen hat. Diese Knollen oder Pastillen haben je nach Vorkommen eine Größe von 1 bis > 100 mm. Im Pazifik schwankt die Größe zwischen 10 und 70 mm Durchmesser. Sie lagern in sedimentationsarmen Tiefseebecken in Teufen bis zu 6000 m unter der Wasseroberfläche. Die einzelnen Partikeln sind deutlich voneinander getrennt. Eine Ablagerung kann als Lagerstätte angesehen werden, wenn die Lagerungsdichte der Knollen > 5 kg/m^2 ist. Die Metallgehalte schwanken in Abhängigkeit vom Vorkommen und von der Lagerungstiefe sehr stark. Ein Mittelwert aus 110 Funden zeigt folgende Metallgehalte: Mangan 32,4 %, Eisen 18,5 %, Kobalt 0,47 %, Nickel 1,14 %, Chrom 0,8 %, Blei 0,19 %.

Es gibt auch Vorkommen mit erheblichen Kupfergehalten. Bekannt sind Werte von 1,65 % Kupfer, bezogen auf Trockenerz. Diese Gehalte liegen z. T. erheblich höher als bei den auf dem Festland abgebauten Lagerstätten. Es wird eingeschätzt, daß im Vergleich zu den Vorräten auf dem Festland an Mangan, Kobalt und Nickel die Vorräte im Meer das 1500- bis 5000fache betragen. Bei einer angestrebten Fördermenge von 1 Mio t pro Jahr und Abbaufeld sind Feldesgrößen um $\approx 10^4$ km^2 für einen Abbaubetrieb unter Berücksichtigung der Verluste und einer Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren erforderlich.

1.5.2. Abbau und Transport

Mariner Abbau wird gegenwärtig fast ausnahmslos im Schelfbereich betrieben, weil sowohl die Erkundungs- als auch die Gewinnungsmöglichkeiten größer sind als im Tiefseebereich. An Gewinnungsgeräten sind bisher vor allem

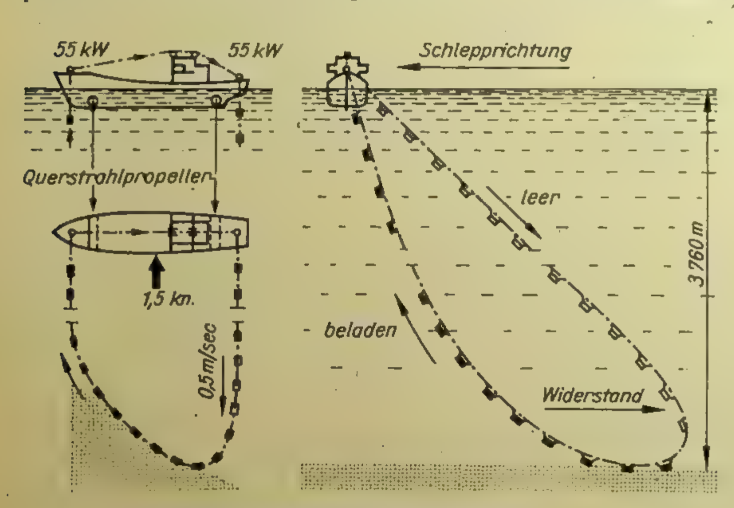


Abb. 1.5.2-1 Behälter-Seil-Förderung (CLB-System)

schwimmende Saugbagger für Teufen bis 35 m, schwimmende Eimerkettenbagger für den Seifenerzabbau bis zu Teufen von 65 m und schwimmende Greiferbagger für Teufen bis 120 m eingesetzt worden. Alle diese Geräte lösen die Rohstoffe am Meeresgrund, nehmen sie auf und heben sie an die Wasseroberfläche. Dort werden sie in Transportschiffen gebunkert und an Land transportiert. Im Zusammenhang mit Saugbaggern ist auch Rohrleitungstransport bis zum Festland möglich und durchgeführt worden.

Der Abbau auf dem Meer bringt im Vergleich zum Bergbau auf dem Festland eine Fülle von zu lösenden Problemen mit sich.

– Die Positionierung des Baggerschiffs in bezug auf bestimmte zu erreichende Lagerstättenteile erfordert einen besonderen Aufwand.

– Die Beibehaltung der Position unter dem Einfluß von Wellengang, Gezeiten und Strömungen macht ganz besondere Maßnahmen und Anstrengungen erforderlich.

– Der Einfluß von Nebel, Sturm und Eis macht sich auf dem Meer besonders bemerkbar.

– Es sind meist geringmächtige Schichtlagerstätten mit stark wechselnder Mächtigkeit auf größeren Flächen abzubauen.

Diese Schwierigkeiten bedeuten jedoch keinen Hinderungsgrund dafür, daß der Abbau im Schelfbereich in den kommenden Jahren noch erheblich erweitert wird und daß sogar der Abbau in der Tiefsee im industriellen Maßstab beginnt.

Abbauverfahren. Die Manganknollen der Tiefsee (vgl. 1.5.1.) sind aufgrund ihres wertvollen Metallgehalts eine große Aufgabe für den marinen Bergbau. Nach Vorversuchen im Jahre 1970 wurden 1973 in fast 4000 m Wassertiefe Großversuche mit der sog. *Behälter-Seil-Förderung* durchgeführt. Über Heck und Bug eines Schiffs läuft ein endloses Seil um, das in bestimmten Abständen mit Gefäßen besetzt ist und beim Umlaufen über den Meeresboden geschleppt wird (Abb. 1.5.2-1). Die Manganknollen werden dabei wie beim Eimerkettenbagger von den Gefäßen aufgenommen.

Die Manganknollenförderung, mit dem *Lufthebeverfahren* wurde im Jahre 1970 bei 800 m Wasserüberdeckung erprobt. Dabei sind die Erzpartikeln auf dem Meeresgrund durch einen sog. Knollenfänger aufgenommen und mit Luftheber zur Oberfläche transportiert worden (Abb. 1.5.2-2). Mit dieser Ausrüstung wurden Fördermassen von 30 bis 40 t/h erreicht. Der Luftheber oder auch *Airlift* beruht auf dem Prinzip, daß in ein Standrohr unter Wasser Druckluft eingeleitet wird. Die Dichte des Wasser-Luft-Gemisches ist geringer als die Dichte des das Standrohr umschließenden Wassers. Dadurch kommt es im Rohr zu einer Bewegung nach oben. Von der Bewegung können am Fuße des Standrohrs auch feste Teilchen, z. B. Manganknollen, erfaßt und an die Wasseroberfläche

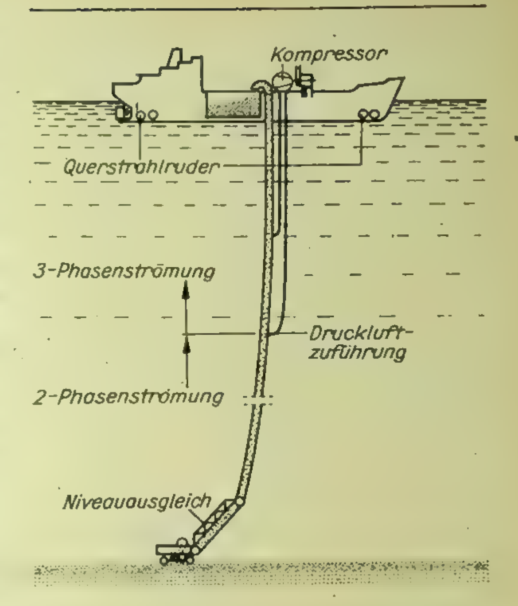


Abb. 1.5.2-2 Luftheber

transportiert werden. Schwierigkeiten bei der Anwendung in großen Teufen bestehen in der Beherrschung unkontrollierter Entmischungen und daraus resultierender Verstopfungen sowie in der hohen Druckbeanspruchung der Rohre von außen.

Ein weiteres Verfahren ist der *Jetlift*, dessen Prinzip auch in der Wasserstrahlpumpe realisiert ist. In einer bestimmten Teufe wird dabei Druckwasser in das Standrohr eingespritzt. Es ist ohne weiteres ein Hintereinanderschalten von mehreren Einspritzeinheiten möglich. Die Pumpensätze für die Druckwassererzeugung werden an Bord des Schiffs untergebracht. Insgesamt erscheint dieses Verfahren für die Hochförderung aus großen Teufen als glänzend geeignet. Eine großtechnische Erprobung wurde bisher noch nicht durchgeführt. Zur Zeit wird weltweit eine sehr umfangreiche Grundlagenforschung für den Meeresbergbau durchgeführt.

Weitere Möglichkeiten des Abbaus bestehen darin, ein stählernes Grundnetz, das sich nach hinten schlauchförmig verjüngt und hinten offen ist, über den Meeresboden zu ziehen. Die Manganknollen würden dabei auf einer bestimmten Breite „abgeerntet" und auf Streifenhalden zusammengebracht, von wo aus sie an die Oberfläche geholt werden könnten.

Eine andere Konstruktion ist eine baggerartige Gewinnungsmaschine, die auf Raupen auf dem Meeresboden fährt und mit Hilfe eines Auslegers und eines schneidkopfähnlichen Gewinnungsorgans den Meeresboden bei einem Durchgang auf einer Breite von 20 m „aberntet". Das Gerät

wird ferngesteuert und ist mit Beleuchtung und Televisionskamera ausgerüstet. Auch damit könnten sehr gut Streifenhalden aufgeschüttet werden.

Transport. Beim Abbau von Manganknollen auf hoher See, weitab vom Festland, wird es notwendig sein, an der Wasseroberfläche als Zwischenglied zwischen Abbau und Transport eine größere Einheit zu stationieren, wie das von der Kohlenwasserstoff-Gewinnung auf dem Meer her bekannt ist. Allerdings gibt es für eine solche große Operationsbasis unter den Bedingungen der sehr großen Entfernung vom Festland bisher noch keine Erfahrungen. Es sind Vorstellungen vorhanden, daß dafür große Schiffskörper, für die Schiffbauerfahrungen vorliegen, verwendet werden könnten. Weiterhin kämen Schwimmkörper-Spezialkonstruktionen in Form von überlangen Schiffen in Frage. Schließlich könnten auch Halbtaucher eingesetzt werden, deren Aufbau sich z. T. unter der Wasseroberfläche befindet. Dem Vorteil des guten Seeverhaltens bei dieser Art steht der Nachteil der schlechten Ladefähigkeit gegenüber. Für den Transport kommen Massengutschiffe mit ≈ 70000 tdw und einer Geschwindigkeit von 15 kn in Frage. Das Beladen und das Löschen im Hafen könnten mit hydraulischer Förderung erfolgen, wenn die Knollen auf der Operationsbasis zerkleinert und mit Wasser vermischt würden. Dieses Verfahren ist bereits erprobt. Dabei würden jedoch erhebliche Wassermengen mit dem Rohstoff über große Entfernungen transportiert werden müssen. Eine Aufbereitung der Knollen, die selbst einen Porenwassergehalt von 30 bis 40% haben, unmittelbar auf der Operationsbasis ist zu erwägen.

1.6. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe

Unter der *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe* ist die erste Verarbeitungsstufe fester mineralischer Rohstoffe mit dem Ziel zu verstehen, daraus körnige Absatzprodukte zu erzeugen, an deren stoffliche Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften bestimmte Anforderungen gestellt werden. Die Produkte werden entweder unmittelbar verwertet, z. B. Kalidüngesalze, Feuerkohle, oder aber nachfolgenden Verarbeitungsstufen, z. B. in der Metallurgie, chemischen Industrie, Bauindustrie, keramischen und Glasindustrie, zugeführt. Die Ausgangs- und Endprodukte der Aufbereitungstechnik besitzen einen festdispersen Charakter. Als wichtigste Prozeßhauptgruppen gehören zur *Aufbereitungstechnik*: Zerkleinern, Klassieren, Anreichern, Entwässern, Entstauben, Mischen, Agglomerieren, Brennen und Rösten, Lagern und Fördern.

Die festen mineralischen Rohstoffe, die einer Aufbereitung unterzogen werden, kann man in folgende Gruppen einteilen:

– *Erze*, z. B. Rohhaufwerke der Schwarz-, Bunt-, Leicht-, Edel- und Spurenmetalle sowie der spaltbaren Elemente,

– *anorganisch-nichtmetallische Rohstoffe*, z. B. Baurohstoffe, Salzgesteine, keramische Rohstoffe, Rohstoffe der chemischen Industrie u. a.,

– *feste Brennstoffe*, z. B. Stein- und Braunkohlen.

Das Aufgabegut einer Aufbereitungsanlage für feste mineralische Rohstoffe ist das vorwiegend bergmännisch gewonnene *Rohhaufwerk*. Ein an Wertstoff angereichertes Fertigprodukt eines Aufbereitungsverfahrens nennt man i. allg. *Konzentrat* (Kupferkonzentrat, vgl. 3.3.2.).

Die anfallenden Rückstände eines Aufbereitungsverfahrens heißen *Abgänge* oder *Berge*.

Die Aufbereitungstechnik gewinnt für die Nutzung fester Rohstoffe eine ständig steigende Bedeutung. Das drückt sich einerseits in dem laufend wachsenden Anteil der durch Aufbereitungsverfahren verarbeiteten Rohstoffe und andererseits im zunehmenden Einsatz komplizierterer Prozesse und Verfahren für Rohstoffe mit geringerem Wertstoffgehalt, z. B. Metallgehalt, aus. Man darf als sicher annehmen, daß sich diese Tendenz auch in Zukunft durch „Verarmung" der Lagerstätten im Wertstoffgehalt, durch „Verdünnung" der Rohhaufwerke infolge steigender Mechanisierung im Bergbau und durch andere Faktoren fortsetzen wird.

1.6.1. Zerkleinern und Klassieren

Zerkleinern. *Bedeutung* und *Ziele*. Zerkleinerungsprozesse spielen außer in der Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe auch in anderen Industriezweigen, wie z. B. in der Zement-, chemischen und keramischen Industrie, eine wesentliche Rolle. Das Ziel der Zerkleinerung hängt von den nachfolgenden Prozessen bzw. Verfahrensstufen oder vom Verwendungszweck der Zerkleinerungsprodukte ab. In dieser Hinsicht kann man unterscheiden:

– das Anstreben bestimmter Korngrößenverteilungen,

– die Oberflächenvergrößerung,

– das Aufschließen und damit weitgehendes Freilegen der Wertstoffminerale,

– physikalische und chemische Stoffänderungen, z. B. mechanische Aktivierung.

Grundlagen der Zerkleinerung. Die Zerkleinerung bewirkt das Zerteilen eines Festkörpers in Teilstücke. Dazu ist das Überwinden der atomaren Bindungskräfte auf den Bruchflächen im Innern des Festkörpers mit Hilfe elastischer Spannungen, z. B. Zug- oder Scherspannungen,

notwendig. Bei den meisten Zerkleinerungsprozessen mineralischer Rohstoffe liegt durch Zugspannungen hervorgerufener Sprödbruch vor. Der Bruch beginnt theoretisch dann, wenn an irgendeiner Stelle des Festkörpers die durch die äußere mechanische Beanspruchung im Innern des Körpers ausgelöste Zugspannung die „*molekulare* (theoretische) *Zerreißfestigkeit*" überschreitet. Aus der Inhomogenität realer Festkörper infolge innerer Risse, Hohlräume, Einschlüsse, Kristallgrenzen u. a. ergeben sich beträchtliche Unterschiede zwischen den theoretischen und praktisch beobachteten Festigkeitswerten, so daß die *technische Zerreißfestigkeit* um einige Zehnerpotenzen kleiner als die theoretischen Festigkeitswerte idealer Körper ist.

Beachtliche Arbeitsbeträge, die in Industrieländern bei ≈ 3 bis 4% der jährlich erzeugten Elektroenergie liegen, müssen für die Zerkleinerung von Rohstoffen aller Art aufgewendet werden, und nur ein kleiner Bruchteil (< 1%, bisweilen sogar < 0,1%) der einer Zerkleinerungsmaschine zugeführten Energie wird für Nutzarbeit verbraucht. Unter Nutzarbeit ist dabei jener Arbeitsbetrag zu verstehen, durch den neue Oberflächenenergie gebildet wird.

Zerkleinerungsmaschinen. Die vielfältigen Aufgaben der *Zerkleinerungstechnik* haben zur Entwicklung einer großen Zahl von Maschinentypen geführt, denen bevorzugte Arbeitsbereiche zugeordnet werden können. Ausschlaggebend sind hierfür insbesondere die Festigkeitseigenschaften des Aufgabegutes und die Korngrößenzusammensetzung des zerkleinerten Gutes. Dabei unterteilt man im Bereich der Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe nach den Festigkeitseigenschaften meist in:

– Hartzerkleinerung, z. B. Eruptivgesteine, harte Erze,
– Mittelhartzerkleinerung, z. B. Kalk, Hartsalz, sedimentäre Eisenerze,
– Weichzerkleinerung, z. B. Salze, Weichbraunkohlen, Tone,

und nach der Korngrößenzusammensetzung des zerkleinerten Gutes in:

– Grobzerkleinerung bis ≈ 100 mm obere Korngröße des zerkleinerten Gutes,
– Mittelzerkleinerung bis ≈ 10 mm obere Korngröße des zerkleinerten Gutes,
– Feinzerkleinerung im Bereich unterhalb 10 mm oberer Aufgabekorngröße,
– Feinstzerkleinerung im Bereich unterhalb 0,1 mm obere Aufgabekorngröße.

Für die Grobzerkleinerung harter bis mittelharter Rohstoffe kommen vorwiegend *Backenbrecher* (Abb. 1.6.1-1) und *Kegelbrecher* (Abb. 1.6.1-2) zum Einsatz. Die Zerkleinerung des Gutes erfolgt vor allem durch Druckbeanspruchung zwischen einer festen und einer beweglichen Arbeitsfläche, die aus hochwertigem Hartstahl bestehen und gewöhnlich mit Brechzähnen versehen sind. Nach mehrmaliger Beanspruchung verläßt das

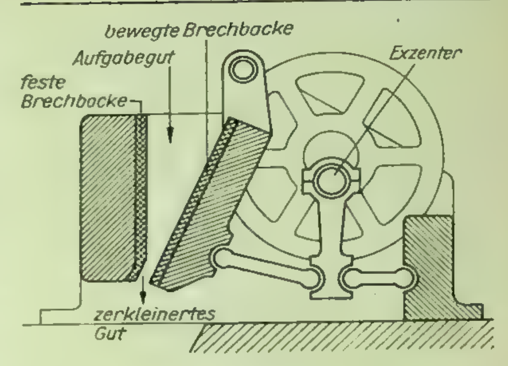


Abb. 1.6.1-1 *Backenbrecher*

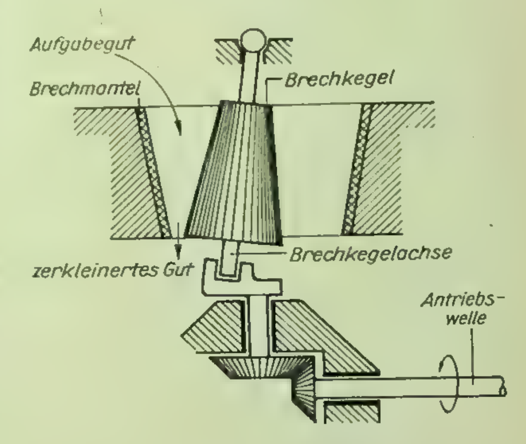


Abb. 1.6.1-2 *Bewegungsschema eines Kegelbrechers mit bewegter Brechkegelachse*

Gut den Brechraum durch den Austragspalt. Die Körnung des gebrochenen Gutes wird durch die Austragspaltweite bestimmt. In *Walzenbrechern* wird das Gut zwischen den Walzen vor allem durch Druck und z. T. durch Scherung beansprucht. Die überwiegende Zahl dieser Brechertypen verfügt über 2 gegenläufig rotierende Walzen, wobei eine Walze fest gelagert und die zweite elastisch abgestützt ist. Die Oberfläche der Walzen von Walzenbrechern ist mit Nocken, Zähnen oder Stacheln besetzt. Sie finden als Grobbrecher für mittelhartes bis weiches Gut Anwendung. *Walzenmühlen* (Feinbrecher) für hartes Material haben glatte Walzenoberflächen.

Prallbrecher (Abb. 1.6.1-3) und *-mühlen* zeichnen sich durch im Arbeitsraum schnell umlaufende Prallwalzen aus, auf denen Zerkleinerungsorgane, die Pralleisten, starr befestigt sind. Das Aufgabegut wird von den mit hoher Geschwindigkeit umlaufenden Pralleisten getroffen und, falls die Bruchspannungen überschritten

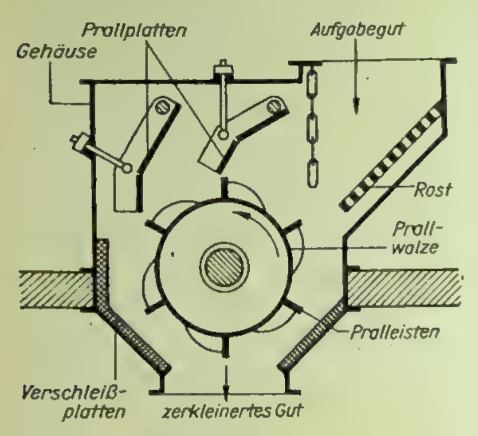


Abb. 1.6.1-3 Prallbrecher

werden, zerkleinert. Daneben erfolgt eine Zerkleinerung des Gutes auch an den Prallplatten und beim Zusammenstoß von Körnern im Prallraum. Brechergehäuse, Pralleisten und -platten bestehen aus verschleißfestem Stahl. Prallbrecher werden für die Grob- bis Mittelzerkleinerung harter bis mittelharter Rohstoffe, Prallmühlen für die Feinzerkleinerung eingesetzt.

Auch *Hammerbrecher* (Abb. 1.6.1-4) und *-mühlen* arbeiten mit einem im Brechraum schnell umlaufenden Rotor, auf dem die Schläger, die Hämmer, gelenkig befestigt sind. Letztere werden beim Umlauf durch Fliehkräfte radial ausgerichtet. Das zugeführte Gut wird hauptsächlich durch Prall und Schlag beansprucht. Sie werden für mittelharte bis weiche Stoffe, die auch zäh und feucht sein können, z. B. Braunkohlen, Salze, Zementrohstoffe u. a., eingesetzt.

Trommelmühlen werden für die Feinzerkleinerung harter bis mittelharter Rohstoffe eingesetzt. Für diese Zerkleinerungsmaschinen ist ein horizontal gelagerter, zylindrischer oder zylindrisch-konischer, rotierender Mahlraum charakteristisch (Abb. 1.6.1-5). In der Trommel befindet sich das Mahlgut mit den Mahlkörpern (Kugeln, Stäbe). Bei der Drehung der Trommel wird der Inhalt umgewälzt bzw. gestürzt und dadurch das Mahlgut durch Druck, Schlag oder Abrieb zerkleinert. Trommelmühlen können kontinuierlich oder diskontinuierlich betrieben werden. Kontinuierlich arbeitende Mühlen besitzen gewöhnlich Öffnungen im Zentrum der Stirnwände, durch die das trockene oder nasse Aufgabegut dem Mühlenraum zugeführt bzw. das gemahlene Gut ausgetragen wird.

Im Prinzip läßt sich jeder mineralische Rohstoff zerkleinern. Die jeweils zweckmäßige Technologie, die Wahl der Ausrüstungen und ihre Arbeitsweise werden wesentlich von den Rohstoffeigenschaften mitbestimmt.

Klassieren. Durch Klassieren werden Körnerkollektive in Korngrößenbereiche getrennt. Als *Trennmerkmale* benutzt man entweder die geometrischen Abmessungen der Körner oder deren Sinkgeschwindigkeiten in flüssigen oder gasförmigen Medien. Danach sind die *Sieb-* und *Stromklassierung* zu unterscheiden.

Beide Klassierprozesse unterscheiden sich hinsichtlich der zu verarbeitenden Korngrößenbereiche. Für Trennkorngrößen > 1 mm setzt man industriell vornehmlich die Siebklassierung, für kleinere dagegen die Stromklassierung ein.

Siebklassierung. Hierbei wird ein Körnerkollektiv, das Siebgut, mit Hilfe eines Siebbodens in 2 Korngrößenbereiche – Grobgut und Feingut – zerlegt. Der verfahrenstechnische Erfolg der Siebung hängt davon ab, inwieweit dem Feingut während der Verweilzeit auf dem Siebboden Gelegenheit gegeben wird, sich unmittelbar oberhalb der Sieböffnungen einzuordnen. Dazu sind Relativbewegungen des Feingutes zum Siebboden erforderlich, die bei den einzelnen Bauarten auf unterschiedliche Weise ausgelöst werden, wobei das Siebgut aufgelockert, umgewälzt und transportiert wird. Zur Lösung dieser Aufgaben sind eine Vielzahl von Siebgeräten, z. B. feste Roste, und vor allem Siebmaschinen, z. B. bewegte Roste, Trommelsiebe, Wurfsiebe, entwickelt worden. Für die industrielle Siebung mineralischer Rohstoffe kommen vorwiegend

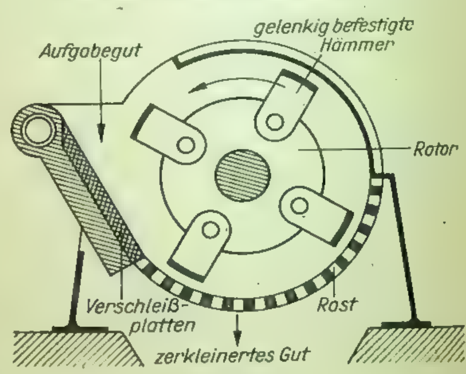


Abb. 1.6.1-4 Hammerbrecher

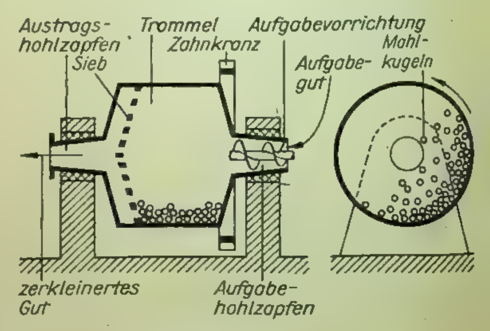


Abb. 1.6.1-5 Trommelmühle

Wurfsiebe zum Einsatz. Sie können nahezu für sämtliche trockenen und nassen Absiebungen im Grob- und Feinkornbereich eingesetzt werden. Bei den meisten Wurfsiebbauarten schwingt der Siebkasten, wobei nach der Form der Schwingungsbahn *Kreis-*, *Ellipsen-* und *Linearschwinger* zu unterscheiden sind. Weit verbreitet sind die zu den Kreisschwingern gehörenden Wucht- und Exzenterschwingsiebe (Abb. 1.6.1-6). Letztere arbeiten mit einer schnell umlaufenden Exzenterwelle, die durch den Schwerpunkt des Siebkastens geführt wird, der auf kräftigen Gummipuffern ruht. Dadurch beschreibt der Siebkasten zwangsläufige Kreisschwingungen. Entsprechend angeordnete Schwungscheiben gleichen die dabei wirkenden Fliehkräfte aus. Um den Siebguttransport zu gewährleisten, muß die Siebfläche bei allen Kreisschwingern genügend geneigt sein.

Stromklassierung. Bei der Stromklassierung erfolgt die Trennung der Körner vorwiegend aufgrund ihrer unterschiedlichen Sink- bzw. Endfallgeschwindigkeiten, die sie unter der Wirkung eines Kraftfelds in einem Fluid erlangen. Ein Korn wird in einem Kraftfeld, z. B. Schwerkraftfeld, Zentrifugalkraftfeld, so lange beschleunigt, bis die durch die Umströmung des Fluids ausgelöste Widerstandskraft gleich der beschleunigenden Kraft geworden ist. Dann hat es in einem homogenen Kraftfeld seine Endfallgeschwindigkeit erreicht.

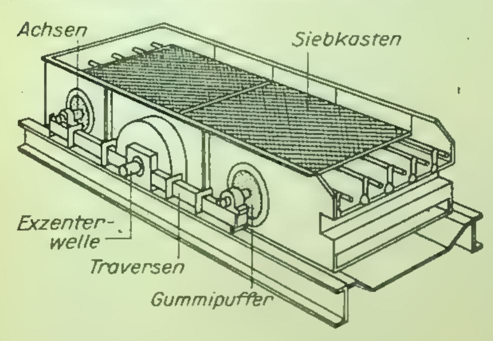


Abb. 1.6.1-6 *Exzenterschwingsieb*

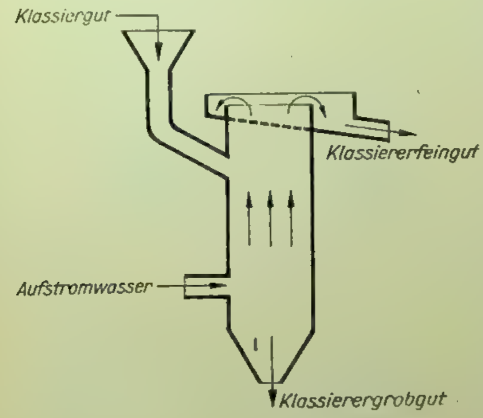


Abb. 1.6.1-7 *Aufstromklassierer (schematisch)*

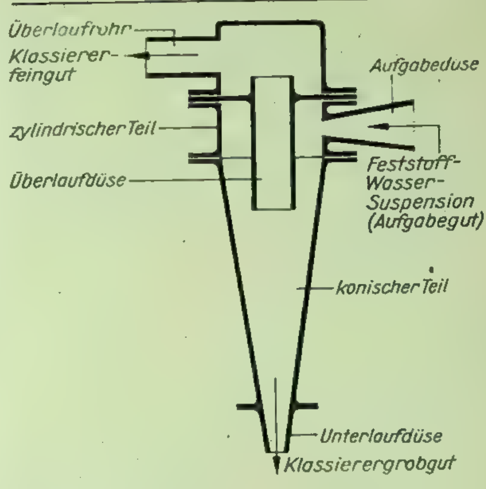


Abb. 1.6.1-8 *Hydrozyklon*

Je nachdem, ob die Trennung in Wasser oder Luft durchgeführt wird, spricht man von *nasser Stromklassierung* oder *Windsichtung*. Für beide Prozesse gelten ähnliche Gesetzmäßigkeiten. Hinsichtlich der für die Kornbeschleunigung wirksamen Kräfte wird in Schwerkraft- und Zentrifugalkraftklassierer gegliedert. Bei den Schwerkraftklassierern sind solche mit bevorzugt horizontal gerichtetem Wasserstrom, die Horizontalstromklassierer, wie z. B. Klassierkegel, mechanische Klassierer, von denen mit Aufstrom, den Aufstromklassierern, zu unterscheiden. Bei den *Horizontalstromklassierern* gelangen nur jene Körner in den Überlauf, deren Sinkgeschwindigkeit so klein ist, daß sie sich während der Verweilzeit im Klassierraum nicht dem Horizontalstrom entziehen können. Für *Aufstromklassierer* (Abb. 1.6.1-7) ist kennzeichnend, daß im Klassierraum durch Zusatzwasser ein Aufstrom erzeugt wird. Daher können nur jene Körner absinken, deren Sinkgeschwindigkeit größer als die Aufstromgeschwindigkeit ist. Zu den wichtigsten Zentrifugalkraftapparaten gehört der *Hydrozyklon* (Abb. 1.6.1-8), der aus einem feststehenden zylindrisch-konischen Behälter besteht (Tafel 1). Die Trübe wird unter Druck tangential eingeführt und auf diese Weise zu Umlaufströmungen gezwungen. Dabei verbleiben die gröberen Körner im abwärts gerichteten Außenwirbel, die feineren dagegen im aufwärts gerichteten Innenwirbel. Ausgetragen werden die Produkte durch Unter- bzw. Überlaufdüse.

Für die *trockene Klassierung* von Gütern bei Trennkorngrößen von wenigen Mikrometern bis

≈ 0,5 mm stehen vielfältige Sichterbauarten zur Verfügung, von denen die Streuwindsichter die am meisten verbreiteten industriellen Sichter sind. Ihr Einsatz erfolgt vorwiegend in der Zementindustrie.
Bei der Stromklassierung entstehen Korngrößenklassen nur dann, wenn Körner gleicher Dichte und Kornform klassiert werden. Trifft dies nicht zu – und das ist in der Regel der Fall – so werden Sinkgeschwindigkeitsklassen erzeugt.

1.6.2. Anreicherprozesse

Durch die Anwendung von Anreicherprozessen wird die stoffliche Trennung der verschiedenen Mineralkomponenten eines Haufwerks erreicht. Sie beruht auf physikalischer oder chemischer Grundlage und setzt ein Aufschließen der Wertstoffbestandteile durch Zerkleinerung und Klassierung voraus.
Prozesse, die ausreichende Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften zur Trennung ausnutzen, werden als *Sortierprozesse* bezeichnet. Die genutzten Eigenschaften bzw. Trennmerkmale sind die Dichte, die magnetische Suszeptibilität, die elektrischen Eigenschaften, Grenzflächeneigenschaften u. a. physikalische Eigenschaften. Die physikalischen Eigenschaften sind entweder unveränderbar vorgegeben, z. B. die Dichte, oder sie lassen sich durch aufbereitungstechnische Maßnahmen, z. B. durch Zugabe geeigneter Reagenzien zur Veränderung der Grenzflächeneigenschaften bei der Flotation, verändern. Im allgemeinen läßt sich feststellen, daß die Trennung um so einfacher und weniger kostenaufwendig ist, je gröber die Rohstoffe verwachsen und je größer die Unterschiede der zu trennenden Mineralkomponenten hinsichtlich des Trennmerkmals sind. Neben den Sortierprozessen kommen in der modernen Aufbereitungstechnik mehr und mehr auch *chemische Verfahrensstufen* für die Anreicherung mineralischer Rohstoffe zur Anwendung. Von Bedeutung sind gegenwärtig Laugeverfahren mit nachfolgender Abscheidung der Wertstoffe durch Fällprozesse, Ionenaustausch u. a., die Verfahren des Lösens mit anschließender Kristallisation, das Amalgamieren und verschiedene Röstprozesse. Zur Anwendung eines Löse- bzw. Laugeverfahrens wird man in der Regel erst schreiten, wenn Sortierprozesse versagen, d. h. vor allem bei zu feiner Verwachsung. Dies erklärt sich aus den erhöhten Aufwendungen für chemische Anreicherprozesse.
Dichtesortierung. Dichteunterschiede werden seit vielen Jahrhunderten für die Sortierung von Mineralkörnern ausgenutzt. Besondere Bedeutung kommt auch gegenwärtig noch der Trennung nach der Dichte bei der Sortierung der Steinkohle und in Erzaufbereitungsanlagen zu. Dabei sind zu unterscheiden:
– Schwimm-Sink-Sortierung,
– Sortierung in Setzmaschinen,
– Sortierung auf Herden und in Rinnen.
Neben der Dichte wirken bei diesen Prozessen noch andere Einflüsse, wie Korngröße, -form, hydrodynamische Einflüsse, in mehr oder weniger starkem Maße auf den Trennvorgang ein. Für den praktischen Einsatz sind eine Vielzahl von Maschinen und Apparaten für die nasse oder trockene Sortierung sowohl im Schwerkraft- als auch im Zentrifugalkraftfeld entwickelt worden.
Schwimm-Sink-Sortierung. Das nach stofflichen Gesichtspunkten zu trennende Gut wird einem Trennmedium aufgegeben, dessen Dichte zwischen den Dichtewerten der spezifisch leichtesten und der spezifisch schwersten Bestandteile der Aufgabe liegt. In diesem Medium sinken die spezifisch schweren Körner ab und die spezifisch leichteren schwimmen zum Rand des Trennapparats. Als *Trennmedium* verwendet man i. allg. Schwertrüben, d. h. wäßrige Suspensionen, die ≈ 20 bis 35 Vol.-% feingemahlenen *Fest-* bzw. *Schwerstoff*, wie z. B. Magnetit, Ferrosilizium u. a., enthalten. Die damit erzielbaren max. Trübedichten liegen zwischen 2,4 und 3,2 g/cm^3. Der Trennvorgang wird vor allem von den physikalischen Eigenschaften des Trennmediums bestimmt, so daß während des Betriebs eine ständige Kontrolle der Dichte, Konsistenz und Stabilität erfolgen muß. Die Schwimm-Sink-Sortierung gilt als der trennschärfste Dichtesortierprozeß und zeichnet sich durch hohe Durchsätze aus. In der Steinkohlenaufbereitung arbeiten z. B. Anlagen mit Durchsätzen ≦ 2 000 t/h. Eine Reihe von Zusatzeinrichtungen für die Vor- und Nachbehandlung des Gutes und zur Trüberegeneration sind aber erforderlich.
Sortierung in Setzmaschinen. Der Trennvorgang auf einer Setzmaschine ist schematisch in Abb. 1.6.2-1 dargestellt. Durch die Öffnungen eines Setzgutträgers, z. B. Rost, Sieb, auf dem

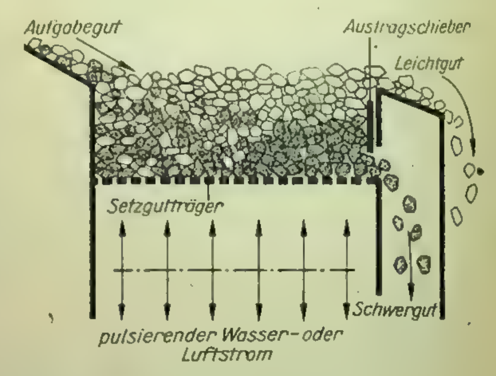


Abb. 1.6.2-1 *Trennvorgang auf einer Setzmaschine*

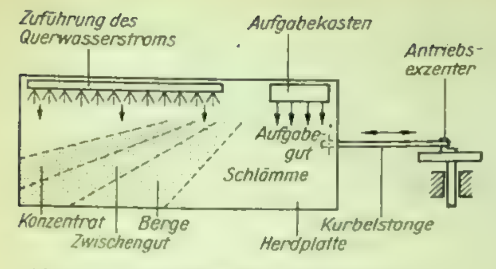


Abb. 1.6.2-2 Schwingherd (schematisch)

das zu sortierende Gut liegt, strömt Wasser oder Luft pulsierend auf und ab. Infolge hydrodynamischer Kraftwirkungen kommt es dabei zur Auflockerung des Gutes, und es vollzieht sich die Schichtung nach der Dichte. Dabei ordnen sich im Setzbett die spezifisch leichteren Körner, z. B. Kohle, über den spezifisch schweren, z. B. Verwachsenes und Berge, ein, wobei die Trennung der einzelnen Komponenten umso besser ist, je größer ihr Dichteunterschied ist. Mit Hilfe von Austragsvorrichtungen lassen sich so Produkte verschiedener Qualität gewinnen.

Sortierung in Rinnen und auf Herden. In Rinnen und auf Herden (Abb. 1.6.2-2) vollzieht sich die stoffliche Trennung in einem flüssigen Medium, das über eine geneigte Fläche strömt. Die zuerst genannten Geräte bestehen aus einem rinnenförmigen Trenngefäß, in dem das Leichtgut, vom Mediumstrom erfaßt, laufend fortgeschwemmt wird, während das Schwergut sich am Rinnenboden einordnet und von Zeit zu Zeit oder kontinuierlich abgezogen wird. Bei den Naßherden strömt eine relativ dünne Aufgabetrübe über eine geneigte Arbeitsfläche, die während des Sortiervorgangs fest verlagert ist bzw. gleichsinnig oder schwingend bewegt wird. Die Oberfläche der Herdplatte kann glatt, mit Riffeln, Rillen o. a. Profilen versehen bzw. mit Gewebe belegt sein. Der Austrag der Produkte erfolgt bei den festen Herden diskontinuierlich, bei den bewegten Herden dagegen wird i. allg. kontinuierlich ausgetragen.

Auf die zu trennenden Körner wirken Massenkräfte, hydrodynamische Kräfte des Mediums (in Fließrichtung und durch Wirbelbildungen auch in anderen Richtungen) und Reibungskräfte. Die bei der Auflockerung des Gutes sich vollziehende Schichtung nach der Dichte unterstützt den selektiven Transport des Gutes und damit die stoffliche Trennung in starkem Maße. Befriedigende stoffliche Trennungen setzen genügend große Dichtedifferenzen und einen hohen Aufschlußgrad voraus. Wichtigste Apparate sind die Fächer- und Wendelrinnen bzw. die Schwingherde.

Sortierung im Magnetfeld wird vorwiegend für die Eisenerzaufbereitung angewendet, wo insbesondere die stark magnetischen Magnetiterze fast gänzlich auf diese Weise angereichert werden.

Bei der Magnetscheidung stehen die Mineralkörner unter dem Einfluß der Kräfte des Magnetfeldes F_m, deren Größe von der Feldstärke H und den magnetischen Eigenschaften der Mineralkörner, der Suszeptibilität $\varkappa$ oder Permeabilität μ, abhängt, und verschiedenen entgegengesetzt gerichteten Kraftkomponenten F_i, z. B. Schwer-, Zentrifugal-, Widerstands- und Trägheitskraft. Unterscheiden sich die Mineralkörner hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften genügend, so ergeben sich letztlich bei der Trennung auf dem Magnetscheider für die einzelnen Körner unterschiedliche Bewegungsbahnen (Abb. 1.6.2-3). Für die Trennung der Mineralkörner sind die magnetischen Felder von ausschlaggebender Bedeutung. Sie werden im Raum zwischen ungleichnamigen Polen von Elektro- oder starken Permanentmagneten erzeugt.

Je nach Größe von Suszeptibilität oder Permeabilität teilt man die Stoffe in *diamagnetische* ($\mu < 1$, $\varkappa < 0$), *paramagnetische* ($\mu > 1$, $\varkappa > 0$) und *ferromagnetische* [$\mu \gg 1$; $\mu = f(H)$] ein. Damit es zu einer Trennung para- oder ferromagnetischer Minerale von den unmagnetischen Stoffen kommt, muß das magnetische Kraftfeld inhomogen ausgebildet sein. Je größer die Inhomogenität des Felds ist, desto stärker werden para- oder ferromagnetische Körper in Richtung steigender Feldliniendichte angezogen, diamagnetische Stoffe dagegen aus dem Feld gedrängt. Prinzipiell unterscheidet man *Schwachfeldscheider* mit Feldstärken < 1000 bis 1300 A/cm und *Starkfeldscheider* mit Feldstärken zwischen 4800 bis 20000 A/cm. Erstere werden zur Anreicherung starkmagnetischer Minerale, z. B. Magnetit, und letztere für schwachmagnetische Rohstoffe, z. B. Brauneisenerz, Hämatit, benutzt.

Elektrosortierung im elektrischen Feld findet vor allem bei der Aufbereitung schwermineralhalti-

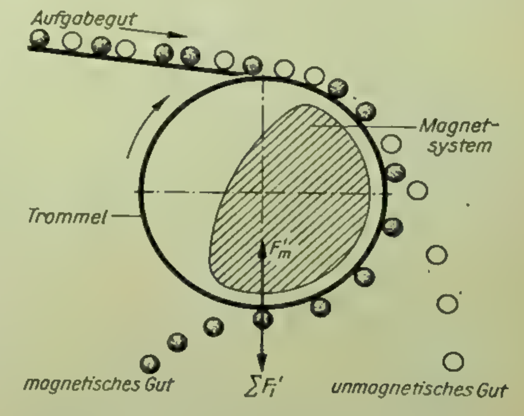


Abb. 1.6.2-3 Arbeitsweise eines Trommelmagnetscheiders (schematisch)

ger Seesande, zur Reinigung verschiedener Erzvorkonzentrate, z. B. nichtferromagnetischer Eisenerze, Zinnerze, sowie für eine Reihe von Aufgaben in der Steine- und Erden-Industrie, z. B. Trennung Feldspat–Quarz, Anwendung. Für die Zukunft ist es durchaus denkbar, daß sich die Elektrosortierung weitere Einsatzgebiete erschließen wird.

Bei der Elektrosortierung werden auf den nach stofflichen Gesichtspunkten zu trennenden Körnern Ladungen unterschiedlicher Größe und nach Möglichkeit auch verschiedenen Vorzeichens erzeugt. Unterschiedliche Coulombsche Kräfte sind die Folge, die mit den stets vorhandenen Massen- und Widerstandskräften zu unterschiedlichen Bewegungsbahnen für die einzelnen Körner im Elektroscheider führen, so daß diese getrennt aufgefangen werden können. Für die Praxis der Mineraltrennung kommen besonders die Aufladung der Mineralkörner bei der *Kontaktpolarisation* im elektrischen Feld während des Kontakts mit einer Elektrode, durch innigen und vielfachen Kontakt der Körner untereinander ohne äußeres Feld (*Reibaufladung*) oder im Koronafeld zur Anwendung. Außer bei der Reibaufladung sind unterschiedliche Ladungsdichten jedoch nur zu erreichen, wenn Leitfähigkeitsunterschiede genügender Größe vorliegen. Das unterschiedliche Verhalten der Stoffe bezüglich der Elektronenleitfähigkeit spielt für die Elektrosortierung eine wichtige Rolle, da die Minerale entweder *Nichtleiter-*, *Leiter-* oder *Halbleitereigenschaften* besitzen. Nur wenige Minerale verhalten sich bei normalen Temperaturen wie Leiter, ein beachtlicher Teil wie Halbleiter und viele wie Nichtleiter.

Nach der Art der Aufladung werden die Scheiderbauarten in *elektrostatische* und *Koronascheider* gegliedert. Mit Koronascheidern lassen sich wesentlich größere Aufladungen als auf Scheidern erreichen, die sich der Kontaktpolarisation oder der Reibaufladung bedienen. Daraus resultieren auch stärkere elektrische Kräfte und der Vorteil der Koronascheider bezüglich Durchsatz und Trennschärfe gegenüber den anderen Scheiderbauarten. Befriedigende Trennerfolge sind auf Elektroscheidern nur nach entsprechend enger Klassierung der Aufgabe zu erwarten. Abb. 1.6.2-4 zeigt den Bewegungsablauf des Gutes auf einem Koronawalzenscheider, der zur Verbesserung der Trennung zusätzlich noch mit einer elektrostatischen Gegenelektrode ausgerüstet ist.

Flotation. Die *Flotation* ist gegenwärtig der für die Fein- und Feinstkornsortierung wichtigste Prozeß. Daran dürfte sich auch in Zukunft nichts ändern. Wenn anfänglich nur sulfidische Erze, später Steinkohle flotiert wurden, so hat sich dieser Sortierprozeß in den letzten Jahrzehnten in ständig steigendem Maße auch für andere

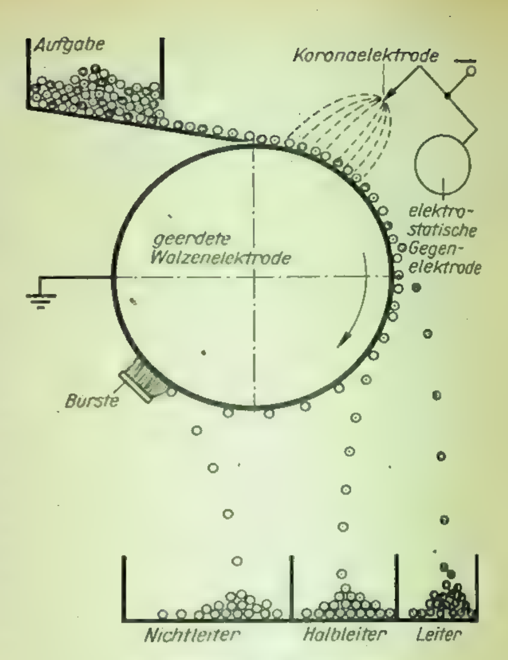


Abb. 1.6.2-4 Dynamik auf einem elektrostatischen Walzenscheider

Erze, anorganische Nichterze und lösliche Salze eingeführt. Die Flotation verdankt ihre große Verbreitung – gegenwärtig wird dieser Prozeß zur Trennung von ≈ 100 Mineralen eingesetzt – nicht nur der Tatsache, daß sie fein verwachsene Rohstoffe anzureichern gestattet, sondern in gleichem Maße ihrer großen Anpassungsfähigkeit mittels eines geeignet gewählten Reagensregimes. Dabei besitzt die *Schaumflotation* die dominierende Rolle in der Mineralaufbereitung. Mit der Entwicklung einer Reihe spezieller Feinkornflotationsprozesse, wie der *Agglomerations-*, der *Trägerflotation*, sowie besonderen

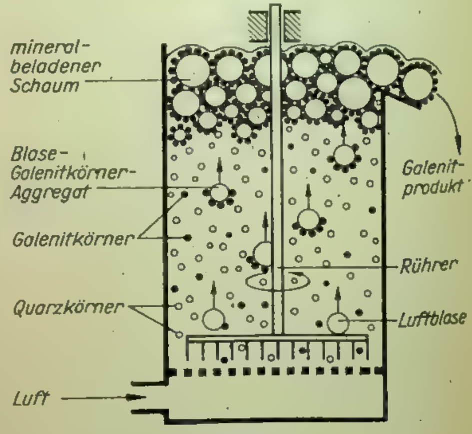


Abb. 1.6.2-5 Flotationsablauf (schematisch)

Prozessen zur Flotation von Grobkorn, wie z. B. der *Schaumseparation*, erschließt sich die Flotation weitere Einsatzgebiete.
Der Ablauf der *Schaumflotation* und ihre wesentlichen Merkmale sind aus Abb. 1.6.2-5 ersichtlich. Die zu trennenden Minerale, z. B. Galenit–Quarz, werden entsprechend ihrer Verwachsungsverhältnisse aufgemahlen und dem Flotationsapparat in Form einer nicht zu dicken Trübe aufgegeben, die zur Aufrechterhaltung der Suspension auf geeignete Weise durchbewegt wird. Das verfahrenstechnische Ziel besteht darin, den Wertstoff, z. B. Galenit, in einem Schaumprodukt an der Trübeoberfläche zu sammeln. Dies erfordert zunächst, daß die aufzuschwimmende Mineralkomponente durch Zusatz von Reagenzien – sog. *Sammlern* – zumindest teilweise hydrophobiert, also nicht benetzbar, wird, während die andere Mineralkomponente – im vorliegenden Fall Quarz –, die in der Flotationstrübe verbleiben soll, hydrophil, also vom Wasser benetzbar, bleibt.
Infolge der oberflächlichen Hydrophobierung der Wertstoffkörner können diese beim Zusammentreffen mit einer Gasblase an dieser haften. Die Gasblasen, die z. B. durch Einblasen von Luft erzeugt werden können, tragen die Wertstoffteilchen zur Trübeoberfläche und bilden dort einen mineralbeladenen Schaum, der von der Oberfläche abgestreift wird. Um den Schaum an der Trübeoberfläche eine gewisse Zeit stabil zu halten, ist der Zusatz eines weiteren grenzflächenaktiven Reagens, des *Schäumers*, notwendig. Sind mehrere Wertstoffkomponenten im Aufgabegut der Flotation enthalten, so ist man i. allg. bestrebt, diese nacheinander getrennt zu gewinnen. Dies fordert den Einsatz geeigneter *Regler*.
Sammler sind organische Reagenzien mit *polar-unpolarem* Aufbau, die den Mineraloberflächen einen für das Anhaften an Gasblasen notwendigen *Hydrophobieeffekt* verleihen. Als hydrophobierende Verbindungen dienen solche mit gesättigten Kohlenwasserstoff-Gruppen. Die Wahl des Sammlers richtet sich nach den zu flotierenden Mineralen. Für die Flotation z. B. sulfidischer Erze verwendet man vorwiegend Alkalixanthogenate, für oxidische Erze dagegen Carboxylate, Alkylsulfate und -ammoniumhydrochloride.
Regler werden bei der Flotation dann verwendet, wenn von mehreren nebeneinander vorliegenden Mineralkomponenten, die bei dem verwendeten pH-Wert und Sammler gleichzeitig aufschwimmen würden, nur eine Mineralkomponente flotieren soll.
Drücker haben die Aufgabe, eine oder mehrere Mineralkomponenten während des Flotationsprozesses *hydrophil* zu halten, die Wirkung des Sammlers zu unterdrücken oder ganz aufzuheben. Als Drücker werden die Verbindungen $NaCN$, Na_2SiO_3, K_2CrO_4, $H_2S_2O_4$ u. a. verwendet,
Beleber heben die Wirkung der Drücker wieder auf. Dadurch wird das Mineral nach entsprechender Sammleradsorption wieder schwimmfähig. Beleber sind Säuren, Basen und Salze, z. B. $CuSO_4$.
Durch *Schäumer* soll ein stabiler Schaum erzeugt werden, der sich nach dem Austragen des Wertstoffprodukts leicht wieder zerstören läßt. Häufig werden verwendet: Xylenol, Kresole, Pine-oil u. a.
Löse- und Laugeverfahren. Die Anreicherung bei sehr fein verwachsenen geringhaltigen oder auch komplex zusammengesetzten mineralischen Rohstoffen, z. B. Uranerzen, oxidischen Buntmetallerzen, Kalisalzen u. a., gelingt vielfach nur mit Hilfe von *Löse-* und und *Laugeverfahrensstufen*. Hierbei wird der Wertstoff zunächst durch Lösen oder Laugen in eine flüssige Phase überführt, diese vom nicht wertstoffhaltigen Feststoff durch mechanische Flüssigkeitsabtrennung (vgl. 1.6.3.) abgetrennt und der Wertstoff schließlich aus der flüssigen Phase – z. T. nach weiterer Anreicherung in der flüssigen Phase z. B. durch Ionenaustausch oder fraktioniertes Fällen – als Kristallisat abgeschieden. Manchmal sind vor dem Lösen oder Laugen Röstprozesse (vgl. 3.3.1.), z. B. chlorierend oder sulfatierend, erforderlich, um eine lösefähige Wertstoffphase zu erzeugen. Zum Lösen oder Laugen bedient man sich fast ausschließlich einer wäßrigen Phase als Lösungsmittel. Dabei setzt man beim Laugen der wäßrigen Phase ein Aufschlußmittel, z. B. H_2SO_4, Na_2CO_3, zu. Für sulfidische Erze gewinnt in neuerer Zeit die *biologische Laugung* an Bedeutung. Durch Bakterien können die beim Laugen erforderlichen stofflichen Umsetzungen beschleunigt oder sogar erst ausgelöst werden. Mit ihrer Hilfe werden die erforderlichen Mengen an Aufschlußmittel erzeugt bzw. regeneriert.

1.6.3. Weitere wichtige Prozeßhauptgruppen der Aufbereitungstechnik

Entwässern. Zwischen- und Endprodukte fallen im Aufbereitungsbetrieb häufig als feuchtes Gut bzw. Trübe an, aus denen das Wasser bzw. die wäßrige Lösung vor der Weiterverarbeitung weitgehend entfernt werden muß. Dies kann durch Prozesse der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung, wie Filtration oder Sedimentation, oder durch Trocknung, der thermischen Entwässerung, erfolgen.
Die *Filtration* (Abb. 1.6.3-1a) ist dadurch gekennzeichnet, daß ein poröses Medium – das Filtermittel – das zu entwässernde Gut zurückhält, während eine treibende Kraft, z. B. die Schwer-, die Zentrifugalkraft oder ein Druckgefälle, das Wasser durch die Poren des Filterkuchens und -mittels bewegt.

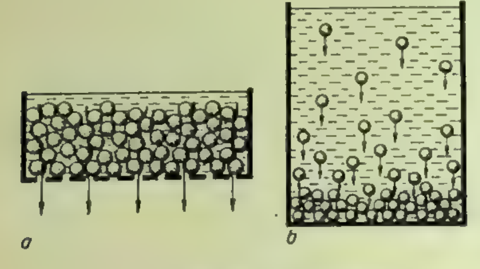


Abb. 1.6.3-1 Mechanische Flüssigkeitsabtrennung: a Filtration, b Sedimentation

Bei der *Sedimentation* (Abb. 1.6.3-1b) setzen sich die in der Trübe suspendierten Feststoffteilchen in *Eindickern* oder *Zentrifugen* ab, sofern ihre Dichte größer als die der Flüssigkeit ist. Geklärte Flüssigkeit und Dickschlamm werden kontinuierlich oder diskontinuierlich abgezogen.

Die *Trocknung* wird i. allg. erst dann angewandt, wenn die gewünschte Restfeuchte mit Hilfe der mechanischen Entwässerung allein nicht zu erreichen ist, da die Kosten für eine thermische Flüssigkeitsabtrennung wesentlich höher sind.

Entstauben. Das Entstehen von Stäuben sehr unterschiedlicher Feinheit läßt sich bei trockenen Aufbereitungsverfahren einschließlich des Förderns und Lagerns praktisch nicht vermeiden. Ohne entsprechende Entstaubungsmaßnahmen würden sich vielfach unzumutbare arbeitshygienische Verhältnisse ergeben, außerdem kann eine unzureichende Entstaubung negative Folgen für die technische Ausrüstung haben, z. B. durch höheren Verschleiß. Durch die Entstaubung werden teilweise bestimmte Wertstoffe zurückgewonnen und die Bildung explosibler Staub-Luft-Gemische, wie sie z. B. in Braunkohlenbrikettfabriken auftreten können, vermieden. Grundsätzlich sind die *Staubentfernung* und *-abscheidung* zu unterscheiden. Die Staubentfernung geschieht durch Absaugen mit entsprechenden Trägerluftmengen. Dazu können *Absaughauben* dienen, die über den stauberzeugenden Maschinen und Apparaten angeordnet werden. Für die anschließende Abscheidung der Staubteilchen aus dem Staub-Luft-Gemisch stehen u. a. *Schwerkraftabscheider* (Absetzkammern), *Zentrifugalkraftabscheider* (Aerozyklone), *elektrische Abscheider, Staubfilter* und *Naßabscheider* zur Verfügung.

Mischen. *Mischprozesse* werden in Aufbereitungsanlagen insbesondere zur Vorbereitung des Gutes für eine Agglomeration und für Absatzprodukte angewendet. Durch das Mischen im *Trommel-, Trog-* oder *pneumatischen Mischer* wird eine gleichmäßigere räumliche Verteilung aller die Mischung aufbauenden Komponenten zu einem homogenen Stoffsystem angestrebt. Dazu müssen im Mischgut Relativbewegungen der Komponenten ablaufen. Den Mischvorgängen können sich Entmischungsvorgänge überlagern, die auf Eigenschaftsdifferenzen zurückzuführen sind, so daß sich nach genügend langer Zeit im Mischer oft ein Gleichgewicht zwischen beiden Vorgängen einstellt.

Agglomerieren. Bei der Aufbereitung vor allem fein verwachsener Rohstoffe fallen teilweise die Produkte in einer zu feinen und bzw. oder zu breiten Korngrößenverteilung an, so daß deren weitere Verarbeitung stark beeinträchtigt oder sogar ausgeschlossen ist. In solchen Fällen ist eine *Kornvergröberung*, die *Agglomeration*, notwendig (Abb. 1.6.3-2, Brikettierung vgl. 1.6.4.). Je nachdem, ob dieser Effekt durch Ausnutzen von Kapillarkräften, Pressen oder unmittelbares Verschmelzen an den Berührungspunkten der Körner erzielt wird, spricht man von *Pelletieren, Brikettieren* oder *Sintern* (vgl. 3.4.4.).

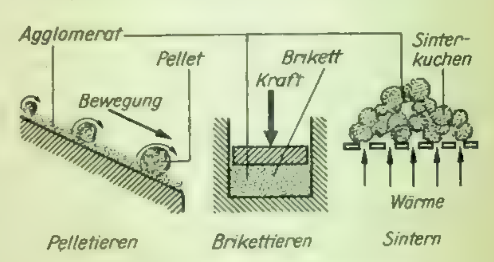


Abb. 1.6.3-2 Wichtigste Agglomerationsverfahren

Lagern. In modernen Aufbereitungsanlagen sind Aufgabegut, Zwischen- und Fertigprodukte sowie Abgänge zu lagern. Das Lagern von Aufgabegut und Zwischenprodukten dient im wesentlichen der mengenmäßigen Vergleichmäßigung der Förderströme. Fertigprodukte sind wegen der vielfach diskontinuierlichen Abförderung zu lagern. Die Lagerung von Aufgabegut, Zwischen- und Fertigprodukten erfolgt meist in *Bunkern* und *Halden*, die der Abgänge in *Halden* und *Becken*. Welcher Lagerart der Vorzug zu geben ist, hängt vor allem von den Guteigenschaften, der erforderlichen Lagerkapazität und den Standortfaktoren ab.

1.6.4. Beispiele zur Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe

Das Ziel der Aufbereitung besteht im wesentlichen darin, ein Absatzprodukt, das Konzentrat, zu erzeugen, dessen Zusammensetzung den Erfordernissen der nachgeschalteten Verarbeitungsstufen oder der Verbraucher entspricht. Trends nach höherwertigen Konzentraten sind unverkennbar.

Erze. *Eisenerze.* Die Wahl der Aufbereitungstechnologie richtet sich nach der chemischen Zusammensetzung des Rohhaufwerks. Für Erze, die aufgrund ihres hohen Eisengehalts direkt verhüttet werden können, besteht die Aufbereitung aus Zerkleinern und Klassieren. Die Klassen liegen für Feinerze < 10 mm, Stückerze 10 bis 30 mm bzw. 10 bis 50 mm und Roherze < 200 mm. Erze, deren direkte Weiterverarbeitung in metallurgischen Anlagen dagegen unwirtschaftlich ist, werden angereichert. Nach Vorzerkleinerung und z. T. Vergleichmäßigung in Mischbetten erfolgt die Feinzerkleinerung des Erzes in meist autogenen Naßmahlanlagen. Anschließend werden magnetitische Eisenerze durch Schwachfeldmagnetscheidung, hämatitische Erze auch durch Dichtesortierung und bzw. oder Flotation (vgl. 1.6.2.) angereichert. Gegenwärtige Tendenzen zielen darauf ab, die Starkfeldmagnetscheidung für feinverwachsene hämatitische Erze zur technischen Reife zu entwickeln. Der von den Erzen bzw. Konzentraten geforderte Eisengehalt liegt > 60%, teilweise sogar > 65%. Für die i. allg. sehr feinkörnig anfallenden Konzentrate schließt sich in zunehmendem Maße ein Agglomerationsprozeß — vorwiegend das Pelletieren (vgl. Abb. 1.6.3-2a) — an.

Buntmetallerze. Bei der Aufbereitung von Buntmetallerzen ist es üblich, ein hohes Wertstoffausbringen unter Einbeziehung der Neben- und Spurenmetalle zu sichern. Dabei werden Buntmetalle, z. B. sulfidische Blei-, Zink- und Kupfererze, nach einer oft recht weitgehenden mehrstufigen Zerkleinerung vorwiegend durch Flotation zu Fertigkonzentraten verarbeitet. Eine Ausnahme bilden gröberer Bergzinnstein und Zinnstein aus Seifenlagerstätten, bei denen noch heute die Herstellung von Fertigkonzentraten durch Dichtesortieren, z. B. auf Setzmaschinen, Rinnenwäschen, Herden, Sortierzyklonen, möglich ist. Die Einführung der Zinnsteinflotation ermöglichte die Aufbereitung fein- und feinstverwachsener Bergzinnerze. Man erhält hierbei Konzentrate mit 10 bis 15 % Zinn. *Uranerze* und *oxidische Kupfererze* werden durch saure Laugung, z. B. mit Schwefelsäure (vgl. 3.3.2.), oder durch alkalische Laugung, z. B. mit Natriumkarbonat, angereichert. Die Gewinnung der Wertstoffe aus der Lösung erfolgt elektrolytisch, durch Zementation (vgl. 3.3.1.) oder durch Fällung.

Nichtmetallisch-anorganische Rohstoffe. *Baurohstoffe.* Mehr als 98 % der in der DDR gewonnenen Gesteinsbaustoffe entfallen auf die Produktion von Schotter, Splitt, Brechsand sowie Kiese und Sande, die als Zuschlagstoff, Bettungs- und Schüttungsmaterial verwendet werden. Bei der Aufbereitung des Haufwerks zu *Schotter, Splitt* und *Brechsand* spielen vor allem Brech- und Klassierprozesse neben dem Lagern, Fördern und Entstauben eine Rolle. Je nach Betriebsgröße und dem erzeugten Produktionssortiment ist die Anzahl der Brechstufen unterschiedlich. Als Zerkleinerungsaggregate finden in erster Linie Backenbrecher als Vorbrecher und Flachkegelbrecher als Nach- oder Splittbrecher Verwendung. Exzenter- und Kreiswuchtschwingsiebe dienen der Trennung und damit Sortierung des Materialstroms in die gewünschten Korngrößenfraktionen, z. B. 2 bis 5 mm, 5 bis 8 mm, 8 bis 12,5 mm u. a.

Der bei weitem vorherrschende Prozeß bei der Aufbereitung der *Sande* und *Kiese* ist die Klassierung des Rohmaterials in die geforderten Korngrößenklassen. Überkorn > 32 mm wird auf Halde geschüttet oder teilweise zerkleinert. Enthält das Rohmaterial größere Anteile an lehmig-tonigen oder abschlämmbaren Bestandteilen, so wird die Aufbereitung in der Regel in Waschtrommeln naß durchgeführt. Zur Abtrennung sog. „leichter Bestandteile", z. B. Kreidekalk, organische Bestandteile, sind Dichtesortierprozesse, z. B. Sortierung auf Setzmaschinen, in Erprobung.

Salzgesteine. Steinsalz wird häufig nur mehrstufig zerkleinert und dient in dieser Form als Speisesalz und als Rohstoff für die chemische Industrie.

Kalisalze werden vornehmlich im Heißlöse-Kristallisations-Verfahren (vor allem Hartsalze) oder durch Flotation (fast ausschließlich Sylvinite) zu Düngemitteln u. a. Rohstoffen für die Herstellung verschiedener Industrieprodukte verarbeitet. Bei der *Heißlöse-Kristallisations-Technologie* reichert man das Rohsalz nach Zerkleinerung auf ≈ 3 bis 6 mm in einer heißen ungesättigten Salzlösung an. Mittels mechanischer Flüssigkeitsabtrennung erhält man sodann eine heiße gesättigte Lösung, aus der durch Kristallisation Kaliumchlorid gewonnen wird. Bei der Flotationstechnologie wird das Rohsalz mehrstufig auf ≈ 0,4 bis 3 mm zerkleinert. Hierfür stehen *Hammer-, Prall-* oder *Walzenbrecher* für die Grob- und Mittelzerkleinerung sowie *Stab-* oder *Autogenmühlen* für die Feinzerkleinerung zur Verfügung. Die Stabmühlen arbeiten mit Klassiereinrichtungen, z. B. Bogensieb, Stößelschwingsieb, im Kreislauf. Die Flotation der leicht löslichen Salze erfolgt in ihren gesättigten Salzlösungen, wobei meist Grob- und Feinkorn getrennt flotiert werden. Im Schaum wird der Sylvin ausgetragen.

Kohlen. ***Steinkohle.*** Rohförderkohle enthält reine Kohlestücke, Berge und verwachsene Bestandteile unterschiedlicher Korngröße. Sie ist damit nicht unmittelbar verwertbar, sondern muß klassiert und angereichert werden, z. B. durch Klauben, Dichtesortierung oder Flotation. Die Aufbereitung liefert sodann Reinkohle verschiedener Körnung, z. B. *Stückkohle* > 80 mm, *Nußkohle* 10 bis 80 mm, *Feinkohle* < 10 mm Korngröße, und *Kohlenstaub.*

Die Aufbereitungsabgänge werden auf Halden verkippt oder als Versatz, zunehmend auch als Rohstoff für die Baumaterialienindustrie, z. B. zur Herstellung von Leichtzuschlagstoffen, verwendet. Das unvollkommen aufgeschlossene, minderwertige Zwischen- oder Mittelgut wird oft im betriebseigenen Kesselhaus verfeuert.

Der größte Teil der in der Welt geförderten Steinkohle wird als Brennstoff eingesetzt. Steinkohle mit < 3 % Schwefel und einem guten Erweichungs- und Backvermögen beim Erhitzen unter Luftabschluß (1 000 bis 1 100 °C, Kokskohle) wird als Rohstoff zur Kokserzeugung verwendet.

Braunkohle. Die aus dem Tagebau kommende Rohbraunkohle enthält 50 bis 60 % Wasser und besteht aus Kohlestücken verschiedener Größe. Sie ist für viele Verwendungs- und Verarbeitungszwecke ungeeignet und wird deshalb aufbereitet.

Naßdienst. Über Förderbänder gelangt die Rohförderkohle vom Kohlebunker in den Naßdienst zu *Stachel-, Glattwalzwerken, Hammer-* oder *Schleudermühlen.* Hier wird die Rohförderkohle zerkleinert und anschließend auf bewegten Rosten, z. B. Walzenroste, oder auf Siebmaschinen in verschiedene Produkte, z. B. gebrochene Förder-, Sieb-, Klarkohle, klassiert. Durch ständiges Füllen von Bunkern mit entsprechendem Fassungsvermögen für Förder-, Brikettier- bzw. Kesselkohle wird der Betrieb der Brikettfabrik und des Kesselhauses von Förderschwankungen des Tagebaus unabhängig.

Trockendienst. Aus dem Naßdienst gelangt die zur Trocknung vorgesehene Klarkohle in einem über dem Trockendienst befindlichen Bunker und von diesem in *Teller-* bzw. *Röhrentrockner,* die meist mit Dampf, letztere z. T. auch mit Gas, beheizt werden (Feuergastrockner). In den Trocknern wird der Wassergehalt herabgesetzt, und zwar zur Verwendung als Brikettierkohle auf ≈ 16 bis 20 % für Normalbriketts bzw. auf ≈ 11 bis 15 % für Feinkornbriketts, als Trockenkohle auf 28 % und als Kohlenstaub auf 9 bis 19 %. Mit weiteren Zerkleinerungs- und Klassiereinrichtungen wird die Trockenkohle in die gewünschten Kornfraktionen der Feinkohle getrennt. Die

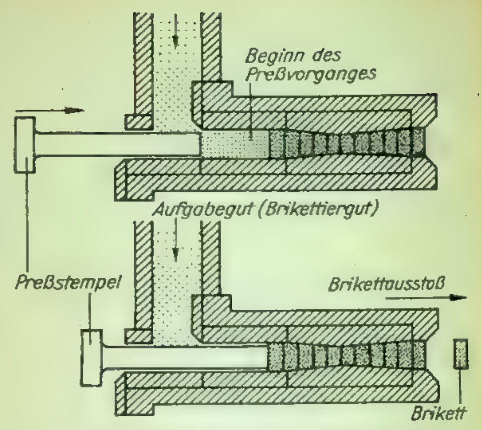


Abb. 1.6.4-1 *Arbeitsweise einer Brikettstrangpresse*

die Trockner mit einer Temperatur von 70 bis 90 °C verlassende Kohle wird im Kühlhaus bis auf 40 °C abgekühlt. Der bei der Trocknung anfallende Kohlenstaub wird teils der Brikettierkohle zugeführt, teils in Kohlenstaubfeuerungen verwendet. Zusätzlich wird für letztere durch Mahlen von Trockenkohle Kohlenstaub in der Korngröße ≦ 0,2 mm erzeugt.

Brikettierung. Die abgekühlte Feinkohle gelangt in die Brikettpresse. Durch einen hin- und hergehenden Preßstempel wird in einem Formzeug bei Drücken bis 120 MPa bei jedem Stempelhub ein Brikett geformt (Abb. 1.6.4-1). Durch die Brikettierung erhöht sich der Heizwert auf ≈ 19 200 bis 20 500 kJ/kg. Nach Verlassen des Pressenmauls bleiben die Briketts weiterhin in geschlossenen Strängen und werden in einer Brikettrinne bei jedem Hub um eine Brikettdicke weitertransportiert. So erreichen sie, an der Luft gekühlt, die Verladung.

Als Haushaltbrikett dient vornehmlich der Ganzstein (180 mm × 70 mm). Andere Brikettformen sind der Halbstein (90 mm × 75 mm) und der Industriestein (52 mm × 65 mm). Nach Korngröße und Wassergehalt der Feinkohle unterscheidet man Haushalt- und Marktbriketts Typ *N* (≦ 6 mm; 17 bis 19 %) sowie verschiedene Veredlungsbriketts, die der Verschwelung, Verkokung und Gaserzeugung dienen.

2. Energietechnik

Der Energiebedarf der Welt wird in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen. Nach der Angabe führender sowjetischer Energieexperten wird sich im Weltmaßstab der Bedarf an Primärenergie aller Energieträger in den Jahren 1980, 1990 und 2000 etwa wie 1:1,5:2,3 verhalten. Trotz leichter Zunahme der Energieumwandlung aus Kohle wird deren Anteil in Relation zu den anderen Energieträgern abnehmen. Ähnliche, nicht so stark ausgeprägte Tendenzen werden Erdöl und Erdgas zeigen, deren prozentualer Anteil an der Energiebereitstellung sinken wird, auch wenn die absoluten Fördermengen ansteigen werden. Die Kernenergie wird jedoch bis zum Jahre 2000 einen Anteil von ≈ 25 % am Energieaufkommen erreichen. Einen beachtlichen Anteil der Energiewandlung werden immer die Wasserkraftwerke behalten. „Moderne" Energieträger, wie Sonnen-, Wind-, Gezeitenenergie, Erdwärme u. a., werden zwar stärker genutzt und entwickelt werden, ihr relativer Anteil bleibt aber voraussichtlich auch in den nächsten Jahrzehnten noch gering.

2.1. Elektroenergie und ihre Quellen

Die Elektroenergie ist eine universell einsetzbare Energieform und nimmt bei der industriellen Entwicklung einen wesentlichen Platz ein.

Daraus resultiert ein vorrangiger Ausbau der energetischen Basis der Wirtschaft, insbesondere der Primärenergiegewinnung, der Umwandlung von Primärenergie in Elektroenergie (Gebrauchsenergie) und Wärmeenergie sowie des Energietransports. Die Primärenergieträger für die Umwandlung in Elektroenergie variieren u. a. bedingt durch ihre territoriale Verteilung, die Wirtschaftlichkeit des Transports und das Umwandlungsverfahren. Generell kommen als Primärenergie die chemisch gebundene Energie der fossilen Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas, Torf), die Kern-, Wasser-, Wind- und Sonnenenergie sowie die Erdwärme u. a. in Frage. Von den genannten haben auf längere Zeit gesehen die fossilen Brennstoffe, die Kernenergie und die potentielle Energie des Wassers die größte Bedeutung. Alle anderen Formen an Primärenergie werden entsprechend den vorhandenen Möglichkeiten und der Wirtschaftlichkeit mehr oder weniger stark genutzt

2.1.1. Wärmekraftwerke

Als Wärmekraftwerk (auch konventionelles Dampfkraftwerk genannt, Tafel 5) wird in der Regel dasjenige Kraftwerk bezeichnet, das auf der Grundlage fossiler Brennstoffe (vgl. 2.2.) und einem Wasser-Dampf-Kreisprozeß arbeitet. In ihm erfolgt die Umwandlung entweder nur in Elektroenergie (Kondensationskraftwerke) oder in Elektroenergie und Heizwärme (Industrie- oder Heizkraftwerke).

Kondensationskraftwerk. In einem Kondensationskraftwerk (Tafel 5) wird der Turbinenabdampf nicht für Heizzwecke verwendet, sondern kondensiert. Neben den Hauptanlagen Dampferzeuger, -turbine, Generator und Blockumspanner besteht das Kondensationskraftwerk aus einer Vielzahl von Elementen. Diese werden zu folgenden Teilsystemen zusammengefaßt (die Erläuterung erfolgt am Beispiel eines mit Rohbraunkohle gefeuerten Kondensationskraftwerks; Abb. 2.1.1-1):

Die *Bekohlungsanlage* hat die Aufgabe, den Brennstoff zum Kraftwerk zu transportieren, dort zwischenzulagern, ihn von unerwünschten Stoffen (Metallteile, Holz) zu befreien, zu zerkleinern, zu trocknen, zu Kohlenstaub zu zermahlen und zu den Brennern zu transportieren. Ein Kondensationskraftwerk verbraucht je nach Heizwert der Brennstoffe bedeutende Brennstoffmengen (Tab. 2.1.1-2).

Man unterscheidet zwischen der *äußeren Bekohlung*, beginnend mit der Übernahme vom Transportmittel (Eisenbahn, Schiff) bzw. mit der Förderung direkt aus der Grube über Zwischenlager, Metall- und Holzabscheider, Grobzerkleinerung mittels Brecher, Bandförderer, bis zur hochliegenden Einführung in das Kraftwerkshauptgebäude und der sich anschließenden *inneren Bekohlung*. Diese besteht aus Verteilungsbändern, Kesselbunkern und weiteren von der Feuerungsart abhängigen Elementen. Bei staubgefeuerten Dampferzeugern gelangt die Kohle

von der Bunkeranlage über Zuteiler und Mühlenfallschächte zu den Kohlemühlen. In den Mühlenfallschächten wird die feuchte Kohle durch Rauchgas getrocknet. Bei kleinen Anlagen gelangt der Brennstoff von der Bunkeranlage über Breitenverteiler und Aufgabetrichter in die Rostfeuerung. Zum Hauptprozeß gehören die Freisetzung der chemischen Bindungsenergie in Form von Wärmeenergie (vgl. 2.6.1.), die anschließende Übertragung der Wärmeenergie auf das Arbeitsmittel (Wasser), Verdampfung (einschließlich Vorwärmung und Überhitzung) desselben, Transport des Dampfs zur Turbine zwecks Umwandlung der Wärmeenergie des Dampfs in mechanische Energie, die im nachgeschalteten Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Der diesem Teilsystem des Kraftwerks zugrunde liegende thermodynamische Kreisprozeß wird als *Clausius-Rankine-Prozeß* bezeichnet. Zur Erreichung eines möglichst hohen Wirkungsgrads werden hohe Frischdampfparameter (Druck und Temperatur), ein geringer Kondensatordruck, eine mehrstufige regenerative Speisewasservorwärmung und eine Zwischenüberhitzung angestrebt (Abb. 2.1.1-3). Darüber hinaus sind für einen wirtschaftlichen Betrieb noch eine Reihe von Elementen im Wasser-Dampf-Prozeß, wie z. B. Entgaser, Laugenentspanner, Luftabsaugeeinrichtungen, erforderlich.

Die *Abgasanlage* hat die Aufgabe, das aus dem Dampferzeuger austretende Rauchgas durch Elektrofilter oder mechanische Abscheider zu reinigen, mittels Saugzeug (Gebläse) das Rauchgas durch den Dampferzeuger und den Staubabscheider zu saugen und in den Schornstein zu drücken, wobei sich die Schornsteinhöhe im wesentlichen aus Aspekten der zulässigen Umweltbelastung (Staub, SO_2) ergibt.

Die *Entaschungsanlage* führt die angefallenen festen Verbrennungsrückstände (Schlacke aus der Brennkammer, Flugasche aus den Abzugstrichtern des Dampferzeugers und der Flugascheabscheider) ab. Für den Abtransport der Asche und Schlacke werden je nach den Eigenschaften des Förderguts Trogketten- oder Gurtförderer, hydraulische und pneumatische Fördereinrichtungen und auch deren Kombination eingesetzt. Die Schlackeabführung aus der Brennkammer erfolgt über den Aschetrichter entweder mittels einer Kratzbandentaschung, bei der die Schlacke in einen mit Wasser gefüllten Trog fällt, aus dem sie mit einem Trogketten-

Tab. 2.1.1-2 *Brennstoffverbrauch eines 1000 MW-Wärmekraftwerks in Abhängigkeit vom Brennstoffheizwert*

Brennstoff	Brennstoffverbrauch in kg/s	Heizwert in MJ/kg
Rohbraunkohle	522,0	5,8
	361,0	8,4
	240,0	12,6
Steinkohle	144,3	21,0
	92,0	33,0
Erdöl	72,0	42,0

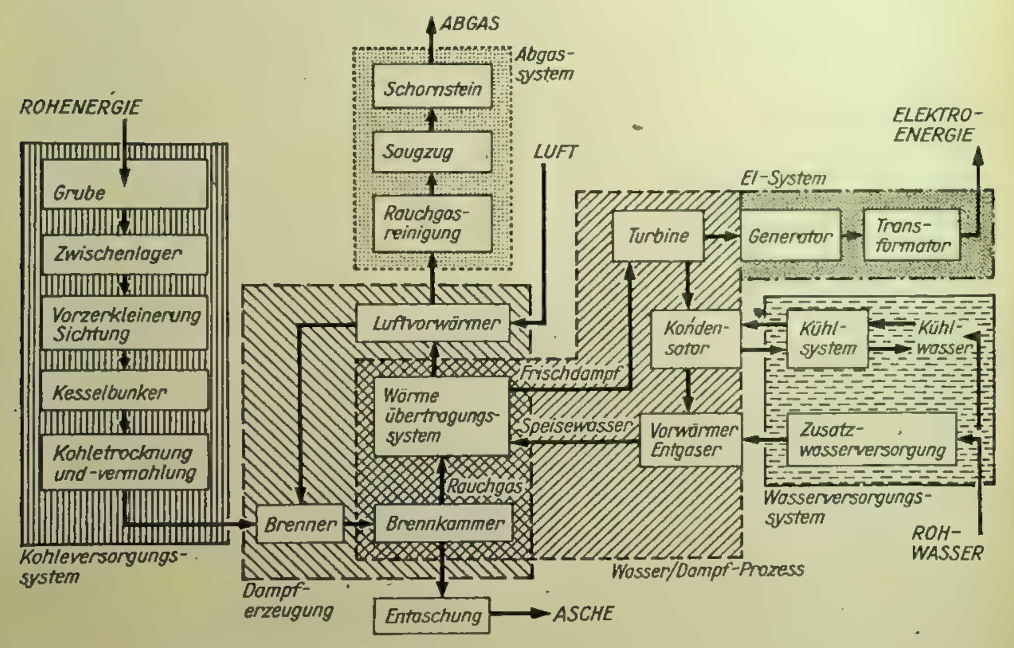


Abb. 2.1.1-1 *Rohbraunkohlen-Kondensationskraftwerk (Schema)*

förderer abgezogen wird, oder hydraulisch mittels Druckwasser in einem geschlossenen Rohrleitungssystem bzw. in einem offenen Gerinne.
Zur Trennung von Schlacke und Wasser werden künstliche oder natürliche Ascheabsetzbecken verwendet. Abgeschiedene Flugasche wird in der Regel pneumatisch in Flugaschebunker gefördert, dort angefeuchtet, durch einen Schneckenförderer staubfrei abgezogen und mit Waggons bzw. LKW abtransportiert. Das *Kühlsystem* stellt in Kondensationskraftwerken die zur Kondensation des Dampfs im Kondensator erforderliche Kühlmittelmenge (Wasser und/oder Luft) bereit. Im allgemeinen kommen folgende Kühlsysteme zur Anwendung: Frischwasser- bzw. Durchflußkühlung mit Fluß- oder Seewasser als *offener Kreislauf* und die Teich- bzw. Rückkühlung mit Verdunstungskühlturm, Luftkondensation bzw. Kühlung durch Luft als *geschlossener Kreislauf*, wobei die Anwendung durch die Wassersituation am Standort bestimmt wird. Bei der *Frischwasserkühlung* saugt eine Kühlwasserpumpenanlage aus einem offenen Gewässer das ≈ 50 bis 60fache der zu kondensierenden Abdampfmenge an, drückt dieses durch die Messing- bzw. Stahlrohre des Turbinenkondensators und fördert das erwärmte Kühlwasser in den Auslauf. Der große Wasserbedarf bei der Frischwasserkühlung schränkt die Anwendung ein. Durch das *Rückkühlsystem* wird der Wasserbedarf auf ≈ 2 bis 3 % gesenkt. Hier läuft das Kühlwasser in einem geschlossenen Kreislauf um und wird in einem Kühlturm auf die Ausgangstemperatur zurückgekühlt. Durch eine Kombination von Frischwasser- und Rückkühlung kann die Wirtschaftlichkeit des Rückkühlbetriebs verbessert werden. Steht Kühlwasser überhaupt nicht oder nur zu überhöhten Kosten zur Verfügung, kann an seiner Stelle Luft für die Kondensation des Dampfs benutzt werden.
Die *Wasserversorgungsanlage* hat das Kraftwerk mit dem erforderlichen Wasser entsprechender Qualität zu versorgen. Bei modernen Großkraftwerken werden große Mengen an Zusatzspeisewasser (hochreines Wasser für den Arbeitsmittelkreislauf aus Verdampfungs- oder chemischen Vollentsalzungsanlagen), bei Verdunstungskühltürmen enorme Mengen an Kühlturmzusatzwasser (Ersatz für verdunstete Menge) sowie technisches Brauchwasser für eine Vielzahl sonstiger Verbraucher, z. B. Kühlung von Motoren, Löschwasser u. a., benötigt.
Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Kraftwerksprozesses wird die *regenerative Speisewasservorwärmung* angewendet. Dem Speisewasser wird stufenweise mittels Anzapfdampf aus der Turbine Wärme zugeführt, wodurch die Wärmeabfuhr im Kondensator verringert wird. Speisewasservorwärmer zwischen Kondensator und Kesselspeisepumpe werden als Niederdruckvorwärmer, zwischen Kesselspeisepumpe und Dampferzeuger als Hochdruckvorwärmer bezeichnet. Niederdruckvorwärmer werden als

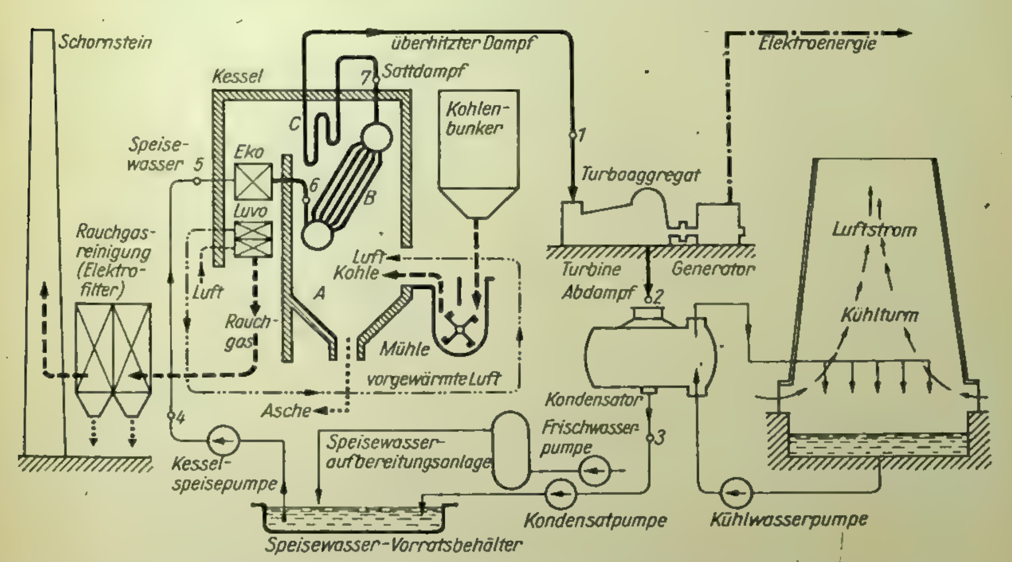


Abb. 2.1.1-3 Funktionsprinzip eines konventionellen Dampfkraftwerks: 1 Frischdampf-Eintritt in die Turbine, 2 Abdampf-Austritt aus der Turbine (Kondensationsdampf), 3 Kondensataustritt aus dem Kondensator, 4 Speisewasser nach Kesselspeisepumpe, 5 Speisewassereintritt in den Dampferzeuger, 6 Austritt aus dem Vorwärmer (Eco) und Eintritt in den Verdampfer (siedende Flüssigkeit), 7 Verdampfereintritt (Sattdampf) und Eintritt in den Überhitzer, A Brennkammer des Dampferzeugers, B Verdampferheizfläche, C Überhitzerheizflächen

Oberflächen- bzw. Mischvorwärmer ausgeführt, während Hochdruckvorwärmer generell Oberflächenvorwärmer sind.
Im *Entgaser* erfolgt eine weitgehende Entfernung der im Speisewasser absorbierten Gase, insbesondere Sauerstoff und Kohlendioxid, zur Verhütung von Korrosionen im Wasser-Dampf-Kreislauf. Die Entsagung kann thermisch und/oder chemisch erfolgen. Bei der thermischen Entgasung wird in einem speziell ausgebildeten Mischvorwärmer das Wasser bis zur Siedetemperatur erwärmt, wobei infolge sinkender Löslichkeit die Gase freigesetzt werden. In der Regel wird thermisch entgast und als Sicherheits- oder Nachentgasung der im Wasser absorbierte Restsauerstoff chemisch gebunden, z. B. mit Hydrazin.
Die *elektrische Anlage* dient der Abführung der Elektroenergie aus dem Generator, der Transformation auf die erforderliche Spannungsebene und dem Abtransport über die Freiluftschaltanlage an das Verbundnetz sowie der elektrischen Eigenbedarfsversorgung des Kraftwerks.
Die *BMSR-Anlage* dient der Erfassung, Meldung und Registrierung von Prozeßdaten sowie zur teilweisen Steuerung und Regelung der Anlage.
Hinsichtlich der bautechnischen Gestaltung des Kraftwerks und der Einordnung der Anlage in das Territorium (Standort) gibt es verschiedene Möglichkeiten, die wiederum von einer Vielzahl von Einflußgrößen, wie Rohenergie, Blockleistung, verfügbare technische Systeme, Bau- und Montagetechnologie, Wasservorkommen, territoriale Bedingungen usw., abhängen.
Eine Übersicht über die wichtigsten mit Rohbraunkohle gefeuerten Kondensationskraftwerke der DDR und deren charakteristische Parameter vermittelt die Tab. 2.1.1-4.
Industrie- und Heizkraftwerke (*IKW* und *HKW*) gewinnen aufgrund der Brennstoffeinsparung gegenüber einer reinen Wärmebereitstellung in Heizwerken eine immer größere Bedeutung und sind, bedingt durch den höheren Anlagenaufwand, bei Wärmebedarfszahlen über ≈ 400 GJ/h wirtschaftlich einsetzbar. Gegenuber reinen Kondensationskraftwerken weisen diese folgende grundsätzliche Unterschiede auf: Der Standort wird aufgrund der Wärmetransportmöglichkeiten stets in der Nähe der Wärmeverbraucher gewählt. Die Einsatz- und Fahrweise richtet sich nach dem Wärmebedarf, wobei die im Koppelprozeß bereitgestellte Elektroenergie entsprechend anfällt. Aus Gründen der Versorgungssicherheit werden stets mehrere Dampferzeuger und Turbosätze sowie Reduzierstationen installiert, wobei derzeit die Sammelschienenschaltung überwiegt, die Tendenz jedoch zur Blockschaltung geht. Die Frischdampfparameter liegen meist niedriger, um auf eine Zwischenüberhitzung verzichten zu können. Bei speziellen Produktionsprozessen kann sich durch den Verlust an Heizkondensat ein entsprechend großer Zusatzwasserbedarf ergeben. Um die energetischen Verluste so klein wie möglich zu gestalten und eine möglichst große elektrische Leistung zu gewährleisten, ist man bemüht, dem jeweiligen Wärmeverbraucher die Wärmeenergie mit der annähernd notwendigen Arbeitsfähigkeit (Energie) zuzuführen, weshalb sich besonders bei IKW Wärmenetze mit verschiedenen Dampfparametern (Druckstufen) ergeben. Grundsätzlich unterscheidet man reine Gegendruck- oder Vorschaltprozesse, Entnah-

Tab. 2.1.1-4 *Konventionelle Kondensationskraftwerke der DDR*

Kraftwerk	Bauzeit	Blockleistung in MW	KW-Leistung in MW
Trattendorf III	1954–56	25	150
Hirschfelde III	1955–58	50	175
Vockerode[1]	1951–59	32	384
Hagenwerder I	1956–60	75	300
Hagenwerder II	1959–63	100	200
Lübbenau I	1957–60	50	300
Lübbenau II	1960–63	100	600
Lübbenau III	1962–64	100	400
Vetschau I	1959–64	100	600
Vetschau II	1963–67	100	600
Lippendorf	1964–69	100	400
Thierbach	1967–71	210	840
Boxberg I	1968–73	210	1 260
Boxberg II	1970–75	210	1 260
Hagenwerder III (Tafel 5)	1970–75	500	1 000

[1] alle Kühlsysteme mit Rückkühlung; Vockerode Durchflußkühlung.

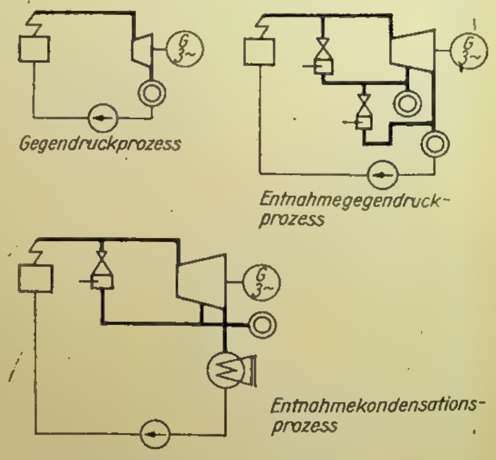


Abb. 2.1.1-5 *Schaltbilder von Industrie- und Heizkraftwerken*

megegendruck- und Entnahmekondensationsprozesse (Abb. 2.1.1-5). Aufgrund der energiewirtschaftlichen und technischen Vorzüge findet der Entnahmegegendruckprozeß eine immer größere Verbreitung, zumal dabei auch der Kühlwasserbedarf für die Kondensation wegfällt.
Müllkraftwerke sind eine spezielle Ausführung der Heizkraftwerke, die vornehmlich mit Haus- und teilweise mit Industriemüll betrieben und zur kommunalen Wärmebedarfsdeckung eingesetzt werden. Bedingt durch die zunehmende Urbanisierung nimmt sowohl die energetische Qualität (der Heizwert entspricht etwa dem von Rohbraunkohle) als auch die Menge des Hausmülls zu. Gegenüber einem Heizkraftwerk auf der Grundlage fester oder flüssiger Brennstoffe weist das Müllkraftwerk Besonderheiten an der Brennstoffversorgungsanlage, dem Walzenrost zur Müllverbrennung und bei der Beseitigung der Verbrennungsrückstände auf.

2.1.2. Gasturbinenkraftwerke

Die Gasturbine (vgl. 2.6.3.) kommt sowohl in einem offenen als auch einem geschlossenen Kraftwerksprozeß zum Einsatz, wobei im ersten Fall fossile Brennstoffe (Öl oder Gas) und im zweiten Kernenergie (Reaktorwärme) verwendet wird.
Das Gasturbinenkraftwerk (*GTKW*) auf der Grundlage fossiler Brennstoffe ist bedingt durch die relativ niedrigen Investitionskosten und den sehr kurzen An- und Abfahrzeiten (18 min bis Vollast) sowie der guten Regelfähigkeit eine typische Spitzenlastanlage und kommt mit max. 1200 h/a zum Einsatz. Die derzeitigen Anlagenleistungen liegen bei ≈ 25 bis 100 MW. Man unterscheidet die sog. Schwer- und Leichtbauweise, die mit alten Flugtriebwerken ausgestattet sind. Die Anlagenwirkungsgrade liegen bei ≈ 25 bis 27 % und sind gegenüber Kondensationskraftwerken relativ gering. Eine Erhöhung des Wirkungsgrads, d. h. bessere Ausnutzung der eingesetzten hochwertigen Rohenergie, kann man durch die Nachschaltung eines Abhitzekessels (Erzeugung von Heizwärme mit den noch sehr heißen Abgasen) oder die Kopplung mit einem Dampfkraftprozeß erreichen, wobei die heißen Abgase aus der Gasturbine, die noch einen hohen Sauerstoffanteil haben, als heiße „Verbrennungsluft" dem Dampferzeuger zugeführt werden. Da der Verdichter ≈ $^2/_3$ der Nutzturbinenarbeit benötigt und nachts aus den Kohlekraftwerken überschüssige Elektroenergie zur Verfügung steht, bietet sich auch in Einzelfällen die effektive Lösung nach Abb. 2.1.2-1 an:
Der Druckluftspeicher, z. B. altes Salzbergwerk, wird nachts durch einen motorgetriebenen Verdichter aufgeladen und in der Spitzenzeit entladen. Dadurch wird die hochwertige Rohenergie voll zur Spitzenlastdeckung und billiger

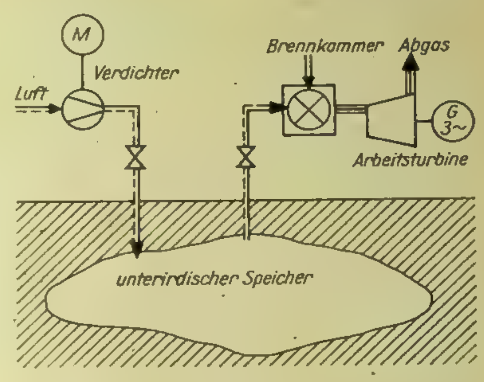


Abb. 2.1.2-1 Gasturbine mit Druckluftspeicher

Nachtstrom zur Verdichtung eingesetzt. Die Anwendung dieser speziellen Schaltung ist jedoch an vorhandene Druckluftspeicher gebunden, weshalb der Einsatz territorial stark eingeschränkt ist.
Bedingt durch die hohen Investitionskosten der nuklearen Anlage kommt der geschlossene Kreisprozeß vornehmlich für Grundlastanlagen zum Einsatz, wobei als Arbeitsmittel Helium angewendet wird.
Der Vorteil gegenüber Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor und Wasser-Dampf-Prozeß liegt u. a. im Einkreislaufsystem, den wesentlich geringeren Abmessungen der Gasturbine und in der höheren Wirtschaftlichkeit der Anlage.

2.1.3. Kernkraftwerke

Bedeutung der Kernkraftwerke. Mit der Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerks der Welt am 27. Juni 1954 in Obninsk in der Nähe von Moskau wurde von der Sowjetunion der Weg zur friedlichen Nutzung der reichen Kernenergiereserven, des Urans und Thoriums, gewiesen. Durch intensive Entwicklungsarbeiten in allen Industrieländern ist es in relativ kurzer Zeit gelungen, Kernkraftwerke (*KKW*) mit hoher technischer Reife und Blockleistungen zwischen 400 und 1 300 MW zu entwickeln, deren Ausrüstungen in Serienproduktion hergestellt werden. KKW arbeiten mit hoher Zuverlässigkeit ohne Gefahr für Bevölkerung und Betriebspersonal, sind durch den Wegfall der Rauch- und Flugascheauswürfe umweltfreundlicher und in Gebieten mit geringen bzw. schwer zu gewinnenden Vorräten an fossilen Brennstoffen wirtschaftlicher als konventionelle Wärmekraftwerke. Der ständig wachsende Bedarf an Elektroenergie ist in wirtschaftlicher Weise nur noch unter Einbeziehung der KKW abdeckbar. Man rechnet damit, daß um die Jahrtausendwende

≈ 40 % der benötigten Elektroenergie durch sie bereitgestellt werden. In der DDR beträgt der Anteil der KKW an der insgesamt installierten Kraftwerksleistung 1980 ≈ 9 % (Tab. 2.1.3-1).

Tab. 2.1.3-1 *In Betrieb und in Bau befindliche Kernkraftwerke der DDR*

Kernkraftwerk	Leistung	Inbetriebnahme
Rheinsberg	70 MW	1966
„Bruno Leuschner" in Lubmin (Greifswald)	8 × 440 MW	erster Block 1973
Stendal	4 × 1000 MW	
Dessau	4 × 1000 MW	

Es werden sowjetische Druckwasserreaktoren eingesetzt.

Arbeitsweise von Kernkraftwerken. KKW, auch *Atomkraftwerke* genannt, sind Wärmekraftwerke, in denen Atomkernenergie über Wärmeenergie in 3 Umwandlungsstufen in Elektroenergie umgewandelt wird. In der zweiten und dritten Umwandlungsstufe unterscheiden sich die heutigen KKW prinzipiell nicht von konventionellen Wärmekraftwerken. Der wesentliche Unterschied besteht in der Art der Freisetzung der Wärmeenergie in der ersten Umwandlungsstufe, die beim konventionellen Wärmekraftwerk durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und beim KKW durch Atomkernspaltung in der aktiven Zone eines Kernreaktors erfolgt. Die Wärme wird mit Hilfe eines *Kühlmittels* (H_2O, CO_2, Helium oder flüssiges Natrium) durch ein Kühlsystem aus dem Reaktor herausgeführt und meist zur Erzeugung von Wasserdampf für den Antrieb von Dampfturbinen genutzt.

Kernspaltung ist die durch Neutroneneinfang ausgelöste Spaltung schwerer Atomkerne, sog. *Spaltstoffe* (Uran-235, Plutonium-239, Uran-233), in 2 leichtere Teilkerne, auch *Spaltprodukte* genannt. Diese Spaltprodukte sind radioaktive β- und γ-Strahler und besitzen eine hohe kinetische Energie. Bei jeder Kernspaltung werden außerdem 2 bis 3 Neutronen und γ-Strahlen frei. Die kinetische Energie der Spaltprodukte (84 %), der Neutronen (2,5 %) und der radioaktiven Strahlung (13,5 %) wird durch Abbremsung in der umgebenden Materie größtenteils in Wärme umgewandelt. Je Spaltung wird eine Energie von ≈ 200 MeV frei, davon bis zu 95 % in Form von Wärme. Zur Freisetzung von 24 MWh Wärmeenergie werden 1,35 g Uran-235 verbraucht. Etwa 7 % der bei der Kernspaltung entstehenden Wärme werden durch die β- und γ-Strahlen der Spaltprodukte verursacht. Dieser Anteil wirkt auch nach „Abschalten" des Reaktors und klingt mit dem radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte nur langsam ab. Es entwickelt sich *Nachzerfalls-* oder *Restwärme*, so daß der Reaktor nach Außerbetriebsetzung weiter gekühlt werden muß.

Kettenreaktion. Ein Teil der bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen kann weitere Spaltstoffkerne zur Spaltung anregen, so daß sich eine Kettenreaktion einstellen kann. Sie kommt dann zustande, wenn von den je Kernspaltung freiwerdenden Neutronen mindestens eines zur Einleitung einer neuen Spaltung erhalten bleibt und die Absorptions- und Oberflächenverluste der Neutronen in der *aktiven Zone* durch entsprechende Materialzusammensetzung und geometrische Abmessungen begrenzt werden (Abb. 2.1.3-2).

Kernbrennstoff ist meist Urandioxid. Natürliches Uran (U) besteht zu 99,28 % aus dem Isotop U-238 und zu 0,72 % aus U-235. Letzteres ist der einzige in der Natur vorkommende Spaltstoff, der zur Kernenergiegewinnung technisch nutzbar ist. Meist ist eine künstliche Anreicherung des Urans an U-235 in Isotopentrennanlagen für den Reaktorbetrieb erforderlich. Durch Neutronenbeschuß von U-238 bzw. Thorium-232 (beide werden auch als *Brutstoffe* bezeichnet) im Kernreaktor entstehen die *künstlichen Spaltstoffe* Plutonium-239 bzw. Uran-233. Diesen Vorgang nennt man *Konversion* oder *Brüten*. Das Verhältnis des im Reaktor erbrüteten zum verbrauchten Spaltstoff nennt man *Brutfaktor*. Erbrüteter Spaltstoff wird außerhalb des Reak-

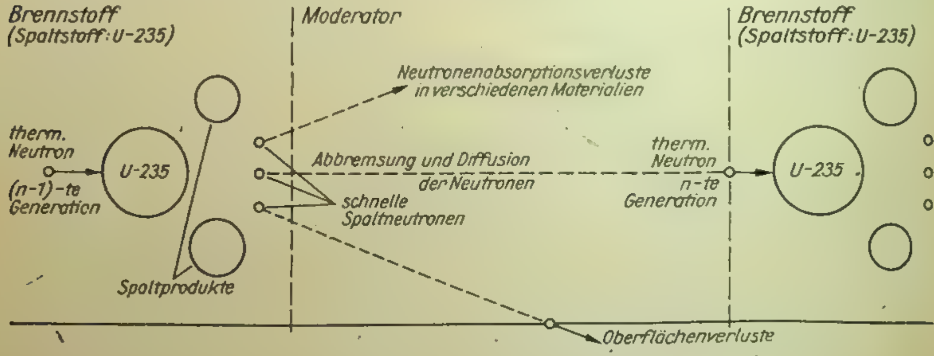


Abb. 2.1.3-2 *Schematische Darstellung der Kettenreaktion im thermischen Reaktor*

tors in speziellen Aufbereitungsanlagen aus dem Brutstoff extrahiert und zur Kernbrennstoffherstellung genutzt (Kernbrennstoffzyklus). Der Kernbrennstoffbestand jedes KKW wird gemäß dem Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen durch die Internationale Atomenergiebehörde (*IAEA*) kontrolliert.

Kernreaktor. In KKW werden heterogene Reaktoren eingesetzt, bei denen der *Kernbrennstoff* in fester Form (vgl. 6.2.4.) in *Brennelementen* (Abb. 2.1.3-3) vorliegt und mechanisch von Kühlmittel und Moderator getrennt ist. Die *aktive Zone* besteht aus mehreren tausend Brennelementen, wobei jeweils eine größere Anzahl zu transportfähigen Einheiten, meist zu *Brennstoffkassetten*, zusammengefaßt sind. Man unterscheidet zwischen thermischen Reaktoren und schnellen Brutreaktoren.

Thermische Kernreaktoren. Die Kernspaltungen werden vorwiegend durch thermische (langsame) Neutronen verursacht. Da die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen schnelle Neutronen mit hohen Energien (im Mittel 1 MeV) sind, müssen sie mit Hilfe eines *Moderators* aus leichten Kernen, z. B. H_2O, D_2O oder Graphit, auf thermische Energie (< 1 eV) abgebremst werden. Mit thermischen Neutronen läßt sich eine um den Faktor 100 größere Spaltwahrscheinlichkeit als mit schnellen Neutronen erreichen, so daß schon bei relativ geringen Spaltstoffkonzentrationen (0,72 bis 5% Anreicherung an U-235) eine Kettenreaktion erzielbar ist. In thermischen Kernreaktoren lassen sich jedoch nur wenige Prozent der Uranvorräte „verbrennen", da der Konversionsfaktor < 1 ist wegen der relativ großen Absorptionsverluste,

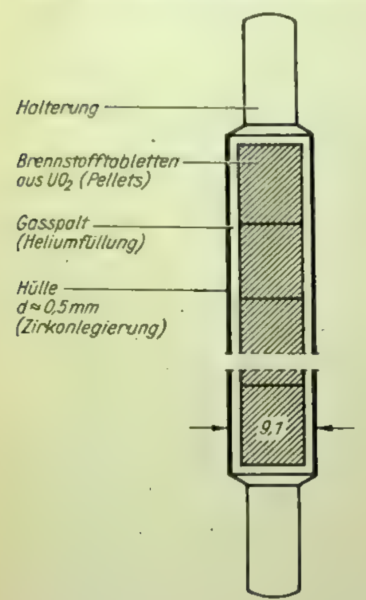


***Abb. 2.1.3-3** Brennelement eines Druckwasserreaktors*

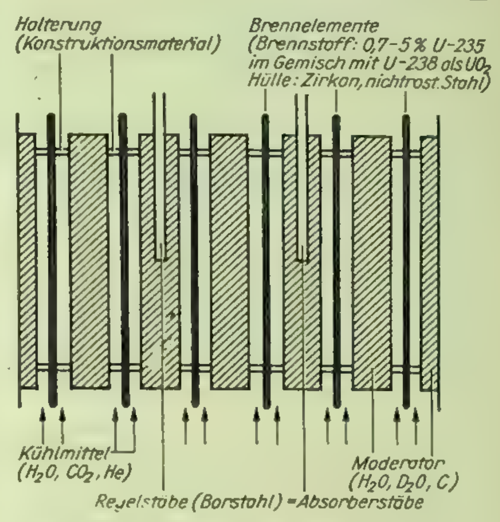


***Abb. 2.1.3-4** Schematische Darstellung der aktiven Zone eines thermischen Reaktors*

die thermische Neutronen erleiden. Die aktive Zone eines thermischen Reaktors (Abb. 2.1.3-4) ist von einem *Neutronenreflektor* aus dem gleichen Material wie der Moderator umgeben.

Schnelle Brutreaktoren. Die Kernspaltungen werden durch schnelle Neutronen eingeleitet (kein Moderator!), Spaltstoffanreicherung ≈ 20 bis 30% an U-235 oder Pu-239. Die *Spaltzone* ist von einer *Brutzone* aus U-238 umgeben. Es werden Brutfaktoren zwischen 1,2 bis 1,5 erreicht, d. h., es entsteht mehr Spaltstoff als verbraucht wird, so daß die gesamten Uran- und auch die Thoriumvorräte zur Energiegewinnung genutzt werden können.

Reaktorsteuerung. Zur Charakterisierung des Verlaufs der Kettenreaktion benutzt man den *effektiven Multiplikationsfaktor* k_{eff} (vgl. Abb. 2.1.3-2):

$$k_{eff} = \frac{\text{Zahl der in der } n\text{-ten Generation im Brennstoff absorbierten Neutronen}}{\text{Zahl der in der } (n-1)\text{-ten Generation im Brennstoff absorbierten Neutronen}}$$

und die *Reaktivität* $\varrho = (k_{eff} - 1)/k_{eff}$. Zur Auslösung einer Kettenreaktion ist eine bestimmte *kritische Masse* an Spaltstoff erforderlich. Wird sie unterschritten, so vergrößern sich bei vorliegender Materialzusammensetzung der aktiven Zone die Oberflächenverluste relativ gegenüber den entstehenden Spaltneutronen und es wird $k_{eff} < 1$.

Zur Steuerung der Kettenreaktion werden in die aktive Zone neutronenabsorbierende Materialien (z. B. borhaltiger Stahl, Kadmium, Boride [vgl. 6.2.4.]), meist in Form von beweglichen

Absorberstäben, eingeführt. Dadurch werden die Neutronenverluste durch Absorption künstlich vergrößert, d. h. k_{eff} verkleinert. Die Beschickung des Reaktors mit Spaltstoff wird so vorgenommen, daß bei herausgezogenen Absorberstäben die kritische Masse weit überschritten würde, d. h. $k_{eff} \gg 1$ wäre und bei vollständig eintauchenden Absorberstäben der Reaktor unterkritisch, d. h. $k_{eff} \ll 1$ ist. Der Reaktor wird in den kritischen Zustand gebracht, indem die Absorberstäbe allmählich so weit herausgezogen werden, bis infolge der Verringerung der Neutronenabsorption $k_{eff} = 1$ wird, d. h. die Kettenreaktion einsetzt. Das ist bei einer mittleren Eintauchtiefe der Absorberstäbe, der sog. *kritischen Stabstellung*, und sehr kleiner Reaktorleistung von $\approx 10^{-10}$ mal der Nennleistung der Fall (Tab. 2.1.3-5). Die ersten zur Einleitung der Kettenreaktion benötigten Neutronen erhält man bei kleinen (Forschungs-) Reaktoren aus künstlichen Neutronenquellen. Bei großen Leistungsreaktoren entstehen im Uran durch spontane Spaltungen ausreichend Quellneutronen von selbst. Zur Erhöhung der Reaktorleistung wird ein Absorberstab um ein kleines Stück Δh über die kritische Stabstellung hinaus angehoben, so daß die Absorptionsverluste verringert werden, also $k_{eff} > 1$ wird. Die Zahl der Kernspaltungen pro Zeiteinheit und damit die Reaktorleistung steigen an. Ist die gewünschte Reaktorleistung erreicht, wird der Absorberstab wieder in die kritische Stabstellung zurückgefahren und die Reaktorleistung bleibt konstant, d. h. $k_{eff} = 1$. Solange Δh so begrenzt wird, daß $k_{eff} < 1{,}007$ bleibt, erfolgt das Anschwellen der Kettenreaktion relativ langsam. So verdoppelt sich z. B. bei $k_{eff} = 1{,}001$ die Reaktorleistung in ≈ 40 s und bei $k_{eff} = 1{,}003$ in ≈ 6 s. Die Vorgänge sind mit technischen Mitteln regelbar. Falls $k_{eff} \geqq 1{,}007$ würde, käme es zu dem sog. *prompt kritischen Zustand*, und die Leistung würde in Sekundenbruchteilen lawinenartig ansteigen. Dieser Vorgang wird bei der Atombombe ausgelöst. Bei den Kernreaktoren sind sicher funktionierende technische Einrichtungen installiert, die ein Erreichen dieses Zustands verhindern. Aber selbst bei Versagen dieser Einrichtungen oder bei Sabotage ist durch eine entsprechende physikalische Auslegung der aktiven Zone eine atombombenartige Explosion des Reaktors unmöglich. Das wird erreicht, indem die Materialzusammensetzung der aktiven Zone so gewählt wird, daß sich bei Leistungs- und Temperaturanstieg k_{eff} verringert und somit eine Selbstregulierung der Kettenreaktion zustande kommt (inhärente Sicherheit).

Tab. 2.1.3-5 *Reaktorzustände*

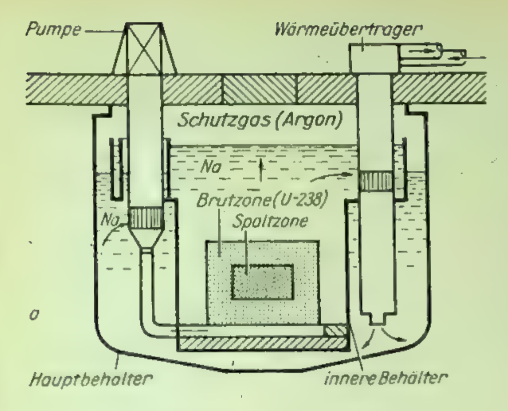
Reaktorzustand	k_{eff}	ϱ	Reaktorleistung (Zahl der Spaltungen pro Zeiteinheit)
kritisch	≈ 1	≈ 0	konstant*
überkritisch	> 1	> 0	steigt kontinuierlich an
unterkritisch	< 1	< 0	sinkt kontinuierlich auf Null ab

* Der Reaktor kann bei jeder beliebigen Leistung kritisch sein, da ja beliebig viele Reaktionsketten parallel ablaufen können.

Während des Leistungsbetriebs werden Spaltstoffkerne verbraucht, und die sich ansammelnden Spaltprodukte absorbieren Neutronen. Diese Vorgänge bezeichnet man als *Abbrand* und *Verschlackung*. Der dadurch bewirkten Tendenz des Unterkritischwerdens des Reaktors wird durch Ziehen der Absorberstäbe entgegengewirkt, d. h., die kritische Stabstellung rückt nach oben. Ist die obere Endstellung der Absorberstäbe erreicht, so muß der Reaktor mit frischem Brennstoff beschickt werden. Da Abbrand und Verschlackung in der aktiven Zone ungleichmäßig erfolgen, wird bei der *Brennstoffumladung*, die bei Druckwasserreaktoren (*DWR*) jährlich einmal erfolgt, nur der am tiefsten abgebrannte Kernbrennstoff ($\approx 1/3$ der Gesamtmenge) durch frischen ersetzt. Ein 10^3 MW-DWR benötigt jährlich ≈ 21 t UO_2 mit 4,5% Anreicherung an U-235. Der ausgeladene Kernbrennstoff enthält noch beträchtliche Mengen an Spalt- und Brutstoff. Er wird wieder aufbereitet und erneut im Reaktor verwendet. Es entsteht ein *Kernbrennstoffzyklus*.

Konstruktion von Kernreaktoren. Alle gegenwärtig erprobten und industriellen Kernreaktoren sind *thermische Reaktoren*, bei denen das Kühlmittel unter hohem Druck und hoher Temperatur steht. Je nach konstruktiver Gestaltung der den Kühlmitteldruck aufnehmenden Elemente unterscheidet man zwischen Druckkessel(*DK*)- und Druckröhren(*DR*)-Bauweise. Industriell hat sich am besten der *Druckwasserreaktor* (Tafel 9) mit Stahl-Druckkesseln bewährt, bei dem vollentsalztes Wasser gleichzeitig Kühlmittel, Moderator und Reflektor ist. Wirtschaftlich gleichwertig und im Aufbau ähnlich ist der *Siedewasserreaktor* in DK-Bauweise, bei dem das Kühlwasser in der aktiven Zone siedet. Beim sowjetischen *Druckröhren-Siedewasser-Reaktor* ist ein als Moderator wirkender Graphitblock von mehr als 10^3 vertikalen Druckröhren durchzogen, in denen sich jeweils ein von siedendem Wasser durchströmtes Brennelementenbündel befindet. Moderne *gasgekühlte* (CO_2 bzw. Helium) *graphitmoderierte Reaktoren* haben Druckkessel aus Spannbeton, in denen gleichzeitig die Umwälzgebläse für das Kühlgas und die Dampferzeuger untergebracht sind, sog. *integrierte Bauweise*. Aussichtsreich scheint die Entwicklung heliumgekühlter graphitmoderierter *Hochtemperaturreaktoren* sowohl zur Elektroenergie- als auch Prozeßwärmeerzeugung.

Von den *schnellen Brutreaktoren* sind die mit flüssigem Natrium gekühlten in der Entwicklung



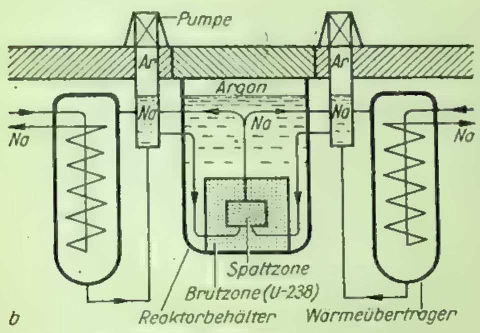


Abb. 2.1.3-6 *Konstruktionsprinzipe schneller natriumgekühlter Brutreaktoren:* ***a*** *Tank-Prinzip,* ***b*** *Schleifen-Prinzip*

am weitesten fortgeschritten (Tafel 9). Man unterscheidet zwischen Tank- und Schleifenbauweise (Abb. 2.1.3-6). Forschungsarbeiten zur Entwicklung gasgekühlter schneller Brutreaktoren werden in verschiedenen Ländern durchgeführt. Prototypanlagen werden noch nicht gebaut.

Kernkraftwerkstypen. In Abhängigkeit vom Kernreaktortyp unterscheidet man die in Abb. 2.1.3-7 dargestellten prinzipiellen Schaltungsarten.

Einkreislaufschaltung. Kühl- und Arbeitsmittel sind identisch. a) *KKW mit Siedewasserreaktoren*: Im Reaktor wird Sattdampf erzeugt und direkt der Turbine zugeführt. Da der Dampf radioaktiv ist, müssen besondere Strahlenschutzmaßnahmen an der Turbine vorgesehen werden. Dieser Typ ist weitverbreitet und wurde in der UdSSR und den USA entwickelt, allerdings mit unterschiedlichen Reaktorkonstruktionen. b) *KKW mit Hochtemperaturreaktoren*: Helium wird im Reaktor auf 700 bis 800 °C erhitzt und direkt einer Helium-Gasturbine zugeführt. Dieser Typ befindet sich in Entwicklung (BRD, UdSSR, USA).

Zweikreislaufschaltung. Kühl- und Arbeitsmittel sind durch einen als Dampferzeuger arbeitenden Wärmeübertrager voneinander getrennt. a) *KKW mit Druckwasserreaktor*: Unter einem Druck von 10 bis 17 MPa stehendes, vollentsalztes Wasser wird mit Hilfe von Hauptumwälzpumpen in mehreren an den Reaktor parallel angeschlossenen Kühlschleifen, die den Primärkreislauf bilden, umgewälzt. Die beim Durchgang durch den Reaktor vom Primärwasser aufgenommene Wärme wird zur Erzeugung von Sattdampf auf der Sekundärseite der in jeder Kühlschleife befindlichen Dampferzeuger genutzt. Der Sattdampf wird der Turbine zugeführt. Der Sekundärkreislauf ist nicht radioaktiv; er stellt den konventionellen Teil des KKW dar. Dieser KKW-Typ wird z. Z. am häufigsten eingesetzt, u. a. auch in der DDR. b) *KKW mit gasgekühltem Reaktor*: CO_2 wird als Reaktorkühlmittel verwendet, das in einem Dampferzeuger überhitzten Dampf erzeugt. Da dieser Typ unwirtschaftlich ist, wird die Entwicklung nicht fortgesetzt. c) *KKW mit Hochtemperaturreaktoren*: Überhitzter Wasserdampf wird als Arbeitsmittel erzeugt.

Dreikreislaufschaltung. Sie wird nur in *KKW mit natriumgekühlten schnellen Brutreaktoren* angewendet. Die im ersten radioaktiven Natrium-

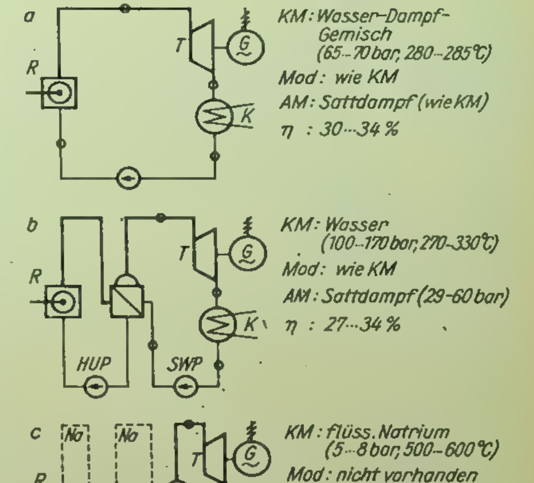


Abb. 2.1.3-7 *Schaltbilder und Kennwerte wichtiger Kernkraftwerkstypen* ***a*** *mit Siedewasserreaktor,* ***b*** *mit Druckwasserreaktor,* ***c*** *mit natriumgekühltem schnellem Brutreaktor*

kreislauf aus dem Reaktor abgeführte Wärme wird in einem Wärmeübertrager an einen zweiten inaktiven Natriumkreislauf übertragen, der aus Sicherheitsgründen eingeschaltet werden muß. Das inaktive Natrium beheizt einen Dampferzeuger, der überhitzten Dampf an die Turbine abgibt. An der Entwicklung dieser KKW wird z. Z. in den führenden Kernenergieländern, vor allem auch in der UdSSR, sehr stark gearbeitet, da nur damit die vollständige Nutzung der natürlichen Uranvorräte möglich ist. Seit 1973 befinden sich die ersten industriellen Versuchsanlagen in Erprobung: BN-350 (UdSSR, 350 MW), Phenix (Frankreich, 250 MW), PFR (England, 250 MW). Größere Anlagen sind im Bau, Industriereife wird um 1990 erwartet.

Strahlenschutz und Sicherheit. In jedem KKW sind umfangreiche technische Einrichtungen und technisch-organisatorische Maßnahmen vorhanden, die einen zuverlässigen Betrieb und das sichere Beherrschen auch außergewöhnlicher Ereignisse gewährleisten. Grundlage sind im Rahmen der IAEA der UNO abgestimmte Grundsätze, deren Einhaltung durch die Genehmigungspflicht für KKW über staatliche Institutionen (in der DDR das Staatliche Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz) gesetzlich abgesichert ist. Einige wesentliche Sicherheitsmaßnahmen sind: Der Reaktor u. a. radioaktive Anlagen sind von *Strahlenabschirmwänden* aus Beton umgeben, die bis zu einigen Metern dick sein können. Gegen das unkontrollierte Entweichen von radioaktiven Substanzen, insbesondere der hochaktiven Spaltprodukte, ist ein mehrfaches *Barrierensystem* vorhanden. Die erste Barriere wird durch die Brennelementehüllen, die zweite durch die Wandungen des Reaktors und Primärkreislaufs und die dritte durch einen sog. *Sicherheitseinschluß* gebildet. Letzterer stellt ein die Reaktoranlage umschließendes gasdichtes Bauwerk dar, das als *Druckraumsystem* oder als *Containment* ausgeführt wird. Meist wird noch ein Schutzgebiet durch einen unbewohnten Umkreis von 1,5 bis 3 km Radius und durch einen gewissen Abstand zu industriellen Ballungszentren um das KKW gebildet. Radioaktive Rückstände werden in speziellen unterirdischen Behältern, dem *Lager für radioaktive Abfälle*, gesammelt und zwischengelagert. Danach werden sie in ein Endlager transportiert, das häufig in ausgebauten Salzbergwerken eingerichtet wird. Andere Methoden der Beseitigung werden diskutiert.

Kernfusion. Bei der Kernfusion werden bei $\approx 10^8$ K Wasserstoffatomkerne zu Heliumatomkernen verschmolzen. Bei der „Synthese" von 1 kg Helium werden $185 \cdot 10^6$ kWh Kernenergie in Form von Wärme frei, während der Energieaufwand zur Erzeugung der hohen Temperatur nur $\approx 1\,\%$ davon ausmacht. Die Energieausbeute ist etwa achtmal höher als bei der Kernspaltung von 1 kg Uran-235. Die Kernfusion findet in der Natur in allen Fixsternen und ungesteuert in der Wasserstoffbombe statt. Eine gesteuerte Kernfusion hofft man im Laborversuch innerhalb der nächsten 20 Jahre zu erreichen. Dabei soll Deuterium (Wasserstoff mit der Massenzahl 2) mit Tritium (Wasserstoff mit der Massenzahl 3) verschmolzen werden. Während Deuterium im natürlichen Wasserstoff zu 0,0156 % enthalten ist und aus Wasser in praktisch unbegrenzter Menge leicht gewinnbar ist, muß Tritium aus Lithium durch Beschuß mit Neutronen (die bei der Kernfusion entstehen), gewonnen werden. Lithium ist jedoch zehnmal häufiger als Uran. 2 Wege werden erforscht: 1. Die Erhitzung und den Einschluß des bis 10^8 K heißen Deuterium-Tritium-Gases (*Plasmas*) übernimmt ein außerordentlich starkes Magnetfeld (magnetische Flasche), das bei den sehr aussichtsreichen sowjetischen „*Tokamak*"-*Versuchsanlagen* die Form eines Toroids hat. 2. die Erhitzung einer kleinen Deuterium-Tritium-Eiskugel in einem großen Stahlgefäß innerhalb von 10^{-9} s auf $\approx 10^8$ K durch starke Laserimpulse, so daß genügend Kernfusionen stattfinden, bevor sich die Kugel ausdehnt (Laserfusion). In beiden Fällen soll die frei werdende Wärme mit Kühlsystemen abgeführt und nach dem Prinzip des Wärmekraftwerks genutzt werden. Der Bau ausgereifter Fusionskraftwerke ist jedoch erst im nächsten Jahrhundert zu erwarten.

Sollte in der weiteren Zukunft die schwieriger zu realisierende Deuterium-Deuterium-Fusion gelingen, stünde der Menschheit in den Weltmeeren eine unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung.

2.1.4. Wasserkraftwerke

In Wasserkraftwerken wird die mechanische Energie fallenden oder strömenden Wassers über Turbinen in Elektroenergie umgewandelt. Die Vorzüge liegen in der ständigen Erneuerung des

Tab. 2.1.4-1 *Auswahl einiger Wasserkraftwerke der Welt*

Kraftwerk	Land	Fluß	Leistung in MW
Sajano-Schuschenskoje	UdSSR	Lena	6400
Krasnojarsk	UdSSR	Jenissei	6000
Bratsk (Tafel 7)	UdSSR	Jenissei	4500
Nurek	UdSSR	Wachsch	2700
Lenin (Kuibyschew)	UdSSR	Wolga	2300
John Day	USA	Columbia River	2170
Assuan (Sadd al-Ali)	ARÄ	Nil	2160
Eisernes Tor	Rumänien/Jugoslawien	Donau	2050
Robert Moses	USA	Niagara	1950

Primärenergieträgers, den relativ großen Wasserkraftreserven, der Umweltfreundlichkeit, den relativ kurzen An- und Abfahrzeiten, der sehr guten Regelfähigkeit sowie in der Kombination mit wasserwirtschaftlichen Aufgaben (Flußregulierung, Hochwasserschutz, Bewässerung usw.). Trotz der relativ hohen Investitionskosten und langen Bauzeiten unternimmt man im Weltmaßstab große Anstrengungen zur maximalen Nutzung der Wasserkraftreserven (Tab. 2.1.4-1, Tafel 7).

Grundsätzlich unterscheidet man die Wasserkraftwerke nach der verfügbaren Fallhöhe (*Niederdruck-* < 15 m, *Mitteldruck-* 15 bis 50 m, *Hochdruckanlagen* > 50 m), nach der Art des Wasserzuflusses zum Kraftwerk (*Lauf-* oder *Flußwasserkraftwerke* mit relativ geringen Stauhöhen und *Speicherkraftwerke* mit großem Speichervolumen und relativ großen Fallhöhen) und nach den eingesetzten Turbinentypen (Pelton-, Francis-, Kaplanturbine, Abb. 2.1.4-2; vgl. 2.6.3.).

In Einzelfällen werden bei modernen großen konventionellen und nuklearen Dampfkraftwerken Wasserturbinen als sog. Energierückgewinnungsanlagen (*ERA*) im Kühlwasserauslauf oder bei Luftkondensationsanlagen (System *Heller*) im geschlossenen Kühlkreislauf eingesetzt.

Pumpspeicherwerke sind spezielle Wasserkraftwerke, die aus einem oberen und unteren Speicherbecken sowie dem Maschinensatz bestehen (Abb. 2.1.4-3, Tafel 8). Die Maschinensätze bestehen bei älteren Anlagen aus einer Wasserturbine, einer Pumpe und einem Motorgenerator (vgl. 11.2.1.) sowie bei den neuesten Anlagen aus einem Motorgenerator und einer Pumpenturbine. Wenn in lastschwachen Zeiten (nachts, Wochenende) im Landesnetz überschüssige Elektroenergie zur Verfügung steht, wird diese zum Antrieb der Pumpen benutzt, wobei Wasser aus dem unteren in das obere Speicherbecken gepumpt wird. In Spitzenbelastungszeiten wird dem oberen Speicherbecken wiederum das gespeicherte Wasser zum Antrieb der Wasserturbine entnommen. Pumpspeicherwerke sind damit reine Spitzenlastkraftwerke, die zwar relativ hohe Investitionskosten und lange Bauzeiten aufweisen, aber bedingt durch die guten Manövriereigenschaften, die günstigen Auswirkungen auf die Auslastung der konventionellen und nuklearen Dampfkraftwerke und die Versorgungssicherheit insgesamt eine hohe volkswirtschaftliche Bedeutung besitzen.

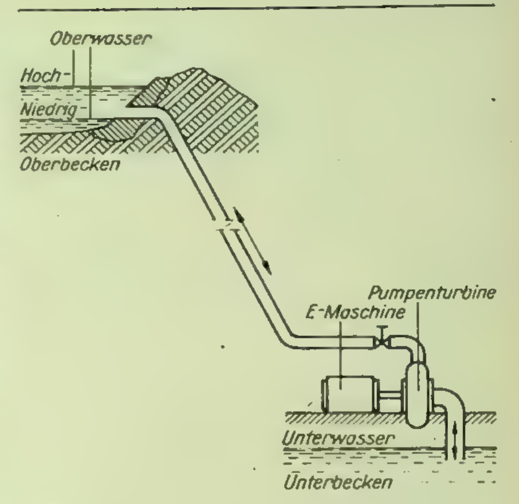


Abb. 2.1.4-3 Prinzip eines Pumpspeicherwerks

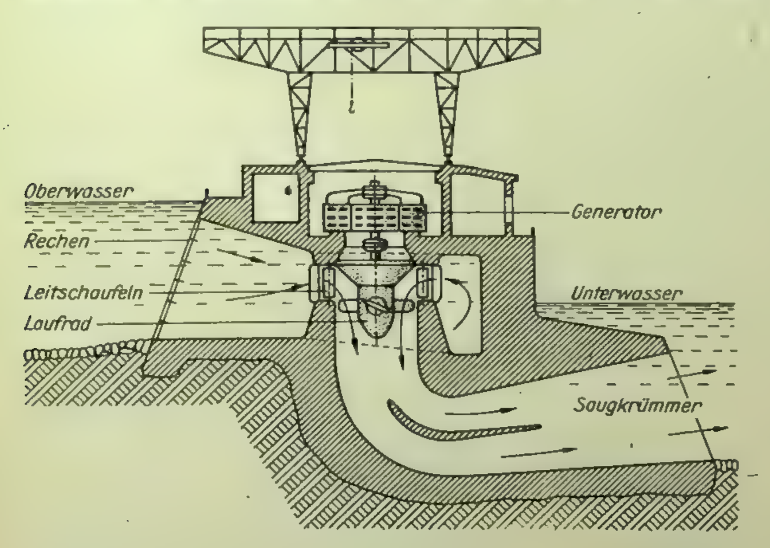


Abb. 2.1.4-2 Aufbau eines Wasserkraftwerks nach dem Laufwasserprinzip mit Kaplanturbine

Besonders für die Volkswirtschaft der DDR sind diese aufgrund fehlender Wasserkraftreserven und eigener Erdöl- und Erdgasquellen (für Gasturbinen) von größter Bedeutung. Der Anlagenwirkungsgrad liegt zwischen 65 und 70% (Tab. 2.1.4-4).

Tab. 2.1.4-4 *Pumpspeicherwerke der DDR*

Name	Bauzeit	KW-Leistung in MW	Turbinenleistung in MW
Bleiloch	1926–30	43,4	21,7
Niederwartha	1927–30 (1951–60 Rekonstr.)	126,0	20,6
Hohenwarte I	1936–42	45,5	21,1
Hohenwarte II	1956–63	320,0	42,0
Wendefurt	1952–59	80,0	41,4
Markersbach	im Bau	1050,0	175,0

Gezeitenkraftwerke sind spezielle Wasserkraftwerke, welche die Gefälleunterschiede zwischen Ebbe und Flut (Tidenschwankungen bzw. -hübe) ausnutzen, wozu sehr kostenaufwendige Staudämme und drehrichtungsumkehrbare Turbogeneratoren notwendig sind. Für das erste Gezeitenkraftwerk der Welt (Rance-Mündung in Frankreich) mußte ein 750 m langer Staudamm zur Abriegelung einer 22 km^2 großen Bucht errichtet werden, wobei der Tidenhub bis zu 14 m beträgt und mit 24 Rohrturbinen eine elektrische Leistung von 240 MW bereitgestellt wird. Die zweite Anlage wurde in der Bucht von Kislaja Guba (UdSSR) errichtet. Man rechnet künftig mit Kraftwerksleistungen bis zu 4000 MW.

2.1.5. Magnetohydrodynamischer Generator (MHD-Generator)

Im MHD-Generator erfolgt eine Energiedirektumwandlung von Wärme- in elektrische Energie, d. h. also ohne den Umweg über die mechanische Energie. Der MHD-Generator arbeitet nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion (vgl. 11.1.2.). Ein erhitztes ionisiertes Gas (Plasma) strömt mit hoher Geschwindigkeit (Überschall) durch ein starkes Magnetfeld, wodurch an den Elektroden eine Spannung induziert wird. Die Effektivität des MHD-Generators hängt in starkem Maße von der elektrischen Leitfähigkeit des Gases und diese wiederum vom Ionisationsgrad, d. h. der Temperatur des Gases ab. Da die Ionisationsgrenze bei ≈ 2300 °C liegt, muß die Arbeitsmitteltemperatur wesentlich darüber liegen. Durch Zusetzen von sog. Impfstoffen (Kalium- und Zäsiumdämpfe) kann die Grenztemperatur etwas abgesenkt werden. Die hierbei erreichten relativ kurzen Betriebszeiten mit den Versuchsanlagen resultieren aus den hohen thermischen Belastungen des Werkstoffs und dem hohen Verschleiß im MHD-Kanal. Durch die sehr hohe Ionisationsgrenztemperatur ist die Abgastemperatur aus dem MHD-Generator sehr hoch. Die Wirtschaftlichkeit wird durch Nachschalten eines Wasser-Dampf-Prozesses bzw. eines Dampfkraftwerks erhöht, wodurch Gesamtwirkungsgrade von 50 bis 60% erreicht werden sollen. In der UdSSR werden z. Z. Versuchsanlagen mit einer Leistung von 5 und 25 MW betrieben. Von den bekannten direkten Energieumwandlungsverfahren hat der MHD-Generator die größten industriellen Einsatzchancen (Abb. 2.1.5-1).

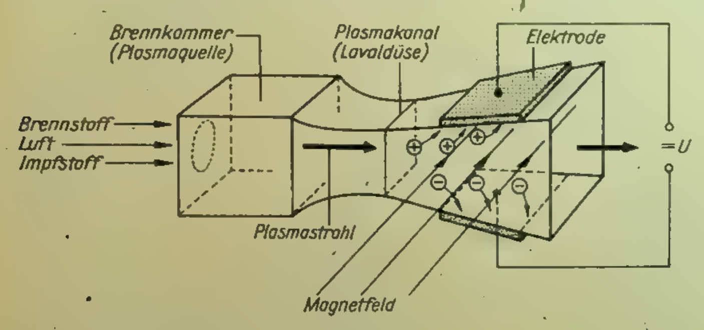


Abb. 2.1.5-1 Prinzip eines MHD-Generators

2.1.6. Elektrochemische Elemente

In den bekannten elektrochemischen Elementen (Trockenbatterie, Blei- oder Nickel-Akkumulator, Brennstoffzelle) findet die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie statt. Sie sind im Alltag von außerordentlich großer Bedeutung, aber aufgrund der relativ geringen spezifischen Leistungen von keinem energiewirtschaftlichen Interesse, d. h., diese galvanischen Elemente kommen nur für spezielle Anwendungsfälle zum Einsatz.

Trockenbatterien (Flachbatterie, Monozelle, Gnomzelle) bestehen aus einem Zinkbecher, einem Kohlestab als Elektrode und einem dazwischenliegenden Elektrolyt (wäßrige Lösung

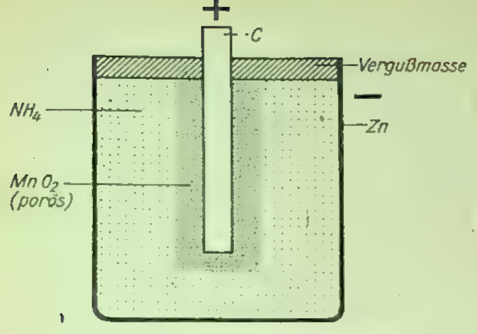


Abb. 2.1.6-1 *Trockenelement (Leclanche-element)*

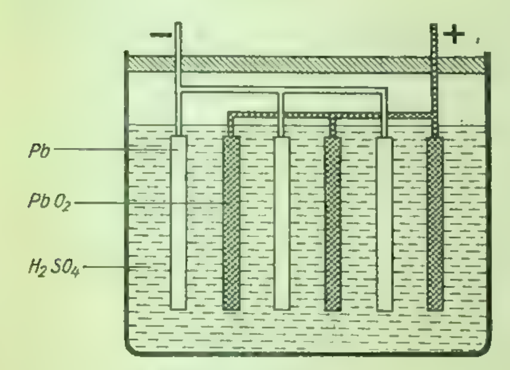


Abb. 2.1.6-2 *Bleiakkumulator*

eines Salzes, einer Säure oder Base, die mit Holzmehl, Mehl, Stärke u. ä. vermischt wird) (Abb. 2.1.6-1).

Die Spannung einer Zelle beträgt max. 1,5 V, weshalb ein Einsatz nur für Sonderzwecke (Kofferradio, elektrische Uhren u. ä.) wirtschaftlich vertretbar ist.

Blei-Akkumulatoren bestehen aus einer Bleioxidplatte (+) und 2 Bleiplatten (−) mit Schwefelsäure als Elektrolyt. Da die Nennspannung einer Zelle nur 2 V beträgt, sind je nach dem spezifischen Anwendungsfall mehrere Zellen hintereinander zu schalten (Abb. 2.1.6-2).

Nickel-Akkumulatoren bestehen ebenfalls aus 2 Elektrodenplatten Nickelhydroxid (+) und Kadmium bzw. Eisen (−) und einem Elektrolyten (KOH). Die Nennspannung beträgt ≈ 1,5 V. Diese Akkumulatoren sind teurer, aber ≈ 30% leichter als Bleiakkumulatoren und weisen eine geringere Lebensdauer auf. Da Akkumulatoren aufladbar sind, kommen sie vor allem als Starterbatterien in Kraftfahrzeugen zur Anwendung.

In Kernkraftwerken dienen große Akkumulatoranlagen auch als Notstromsysteme.

Brennstoffelemente (*Brennstoffzellen*) gehören zu den sog. direkten Energieumwandlungsverfahren (vgl. Abb. 2.1.6-1), da in diesen chemische Bindungsenergie auf dem Wege einer „kalten" Verbrennung direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Der Vorteil gegenüber dem Trockenelement und dem Akkumulator liegt darin, daß dieses Prinzip kontinuierlich arbeitet, d. h. theoretisch eine hohe Lebensdauer aufweist und die Energiebereitstellung nicht durch Ladeprozesse unterbrochen werden muß. Aus der Vielzahl möglicher Brennstoffzellen hat sich hierbei die H_2/O_2-Zelle (*Knallgaselement*) als die bereits praktisch anwendbare (Weltraumfahrt, Landwirtschaft, Militärtechnik) ergeben.

Die H_2/O_2-Zelle besteht aus 2 porösen Elektroden und KOH als Elektrolyt (Abb. 2.1.6-3), wobei jeweils an einer Elektrode Wasserstoff bzw. Sauerstoff zugeführt und als Reaktionsprodukt Wasser (H_2O) abgeführt wird.

Die relativ geringen Leistungsdaten einer Zelle zwingen bei größeren Leistungseinheiten zur Reihen- und Parallelschaltung vieler Zellen. Für eine 16 kW-Versuchsanlage waren ≈ 10^3 Elemente notwendig, wobei ein Wirkungsgrad von ≈ 60% erreicht wurde. Die Brennstoffzelle könnte bei entsprechender Erhöhung der Zuverlässigkeit, Senkung der Investitionskosten und der Leistungsmasse für mobile Antriebszwecke von Interesse sein. In Kopplung mit einer nachts betriebenen Wasserelektrolyse könnte sie auch von energiewirtschaftlicher Bedeutung werden.

2.1.7. Sonnenkraftwerke

Obwohl die Sonne die größte Energiequelle der Erde darstellt, wird diese für energiewirtschaftliche Zwecke im wesentlichen nur indirekt (Wasser- und Windkraft, Kohle, Holz, Torf) genutzt, da eine direkte Nutzung (Sonnenkraftanlagen) zu hohen Investitionskosten und bedingt durch die nichtkontinuierliche Sonneneinstrahlung zu einer relativ geringen Versorgungssicherheit führt. In Mitteleuropa beträgt die spezifische Sonnenscheinleistung bei günstigen Bedingungen 0,8 bis 0,9 kW/m², woraus sich für einen 10^3 MW-Kraftwerksblock eine erforderliche Spiegelfläche von ≈ 10^6 m² ergeben würde. Deshalb wird die Sonnenenergie direkt, trotz

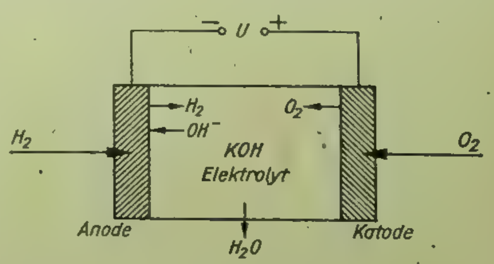


Abb. 2.1.6-3 *H_2/O_2-Brennstoffzelle*

vieler Projekte, vor allem für spezielle Zwecke (Meerwasserentsalzung, Sonnenbatterien in der Weltraumfahrt) eingesetzt.

2.1.8. Windkraftwerke

Die Nutzung der Energie des Windes reicht zwar weit in das Altertum zurück, spielt jedoch aufgrund der relativ geringen Energiedichte, der außerordentlich starken zeitlichen Schwankungen im Energieangebot, den relativ geringen Einheitenleistungen der Windturbine und der relativ hohen Investitionskosten in der Energiewirtschaft keine Rolle. Lediglich in küstennahen und zugleich vom Landesnetz entfernten Gebieten finden Windkraftanlagen für Pumpenantriebe oder zur Elektroenergieversorgung in Verbindung mit Akkumulatoren Anwendung. Bei einer Windgeschwindigkeit von ≈ 10 m/s benötigt man für 1 kW Leistung eine Windradfläche (Flügelfläche) von ≈ 5 m², weshalb die Leistungen der bisher installierten Anlagen ≈ 10 bis 100 kW betragen.

2.1.9. Geothermische Kraftwerke

An einigen Stellen der Erde, z. B. Kamtschatka (UdSSR), Toscana (Italien), Island, Big-Sulphur-Canyon (USA), Neuseeland, liegt die geothermische Tiefenstufe bei 1 °C/m gegenüber einem Normalwert von 0,3 °C/m, woraus sich günstige Bedingungen zur Nutzung der Erdwärme ergeben. Neben einer Nutzung der Erdwärme zur Beheizung von Wohnungen, Gewächshäusern usw. wurden auch bereits eine Reihe von Dampfkraftwerken errichtet, die zum größten Teil direkt mit Dampf aus dem Erdinnern versorgt werden. Die Leistung aller geothermischen Kraftwerke in der Toscana liegen insgesamt bei ≈ 400 MW, wobei die Einheitenleistung bis zu 25 MW beträgt.

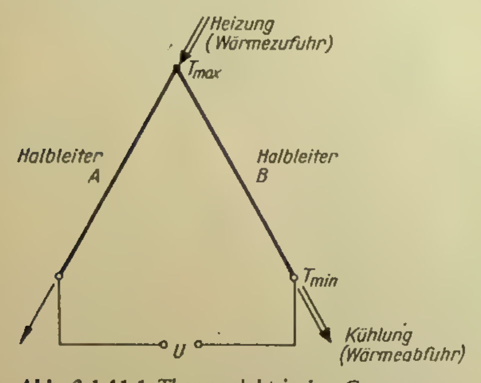


Abb. 2.1.11-1 Thermoelektrischer Generator

2.1.10. Elektroenergie aus Verformungsenergie

Werden bestimmte Kristalle (z. B. Quarz, Zinkblende, Turmalin, Rohrzucker, Bariumtitanat) auf Druck oder Zug beansprucht, so treten an den äußeren Grenzflächen elektrische Ladungen auf (*piezoelektrischer Effekt*). Dieses Prinzip findet keine großtechnische Anwendung und wird u. a. in Mikrofonen, Meßfühlern, Tonabnehmern oder elektrischen Zündsystemen und als Umkehreffekt (*Elektrostriktion*) in Quarzuhren, Lautsprechern und zur Ultraschallerzeugung angewendet.

2.1.11. Der thermoelektrische Generator

Obwohl der thermoelektrische Effekt (*Seebeck-Effekt*) seit vielen Jahrzehnten zur Temperaturmessung (Thermoelement) angewendet wird, wurde erst in den letzten Jahren im Rahmen der Weltraumforschung dieses Prinzip zur direkten Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie, gekoppelt mit einem Kernreaktor oder einer Isotopenwärmequelle, eingesetzt (Abb. 2.1.11-1). Der Vorteil gegenüber anderen Energieumwandlungsverfahren liegt in der Robustheit der Systeme infolge fehlender bewegter Teile. Der Nachteil liegt z. Z. noch im hohen Preis der Elemente, im geringen Wirkungsgrad und in der geringen spezifischen Leistung je Element. In Verbindung mit Reaktoren wurden bereits Leistungen von 100 kW und bei Radionuklidbatterien (Isotopenbatterien) Leistungen bis ≈ 1 kW erreicht. Isotopenbatterien finden auch bereits in der Seefahrt (Bojenbefeuerung) Anwendung.

2.1.12 Der thermionische Generator

Der thermionische Generator (Abb. 2.1.12-1) arbeitet nach dem Prinzip der Hochvakuumdiode und wandelt Wärmeenergie direkt in elektrische Energie um. Als Wärmequellen eignen sich vor allem die Brennelemente von Kernreaktoren und eventuell radioaktive Isotope und die Sonnenenergie.

Die bisherigen Versuche in Kernreaktoren haben die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des Prinzips nachgewiesen, jedoch noch nicht dessen industrielle Reife, da die Elemente den hohen Be-

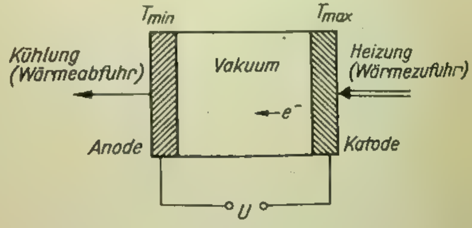


Abb. 2.1.12-1 Thermoionischer Generator

lastungen im Reaktor noch nicht lange genug standhalten.

2.2. Fossile Brennstoffe

In den fossilen Brennstoffen *Kohle, Erdöl* und *Erdgas* ist die Energie chemisch an die Moleküle des Energieträgers, insbesondere an die Kohlenstoffverbindungen, gebunden. Fossile Brennstoffe sind nicht nur Energieträger, sondern auch wertvolle Rohstoffe, vor allem für die Chemieindustrie, so daß ihre komplexe Verwertung angestrebt werden muß. Die fossilen Brennstoffe können in alle erforderlichen Gebrauchs- und Nutzenergien umgewandelt werden, ihre Förderung (vgl. 1.2.-1.4.) kann dem Bedarf angepaßt werden, sie sind speicherfähig und mit Ausnahme der ballastreichen Rohbraunkohle auch transportwürdig. Ihr entscheidender Nachteil ist, daß sie sich allmählich aufbrauchen. Wenn auch noch nicht alle Lagerstätten auf der Erde entdeckt und erkundet sind, so läßt sich doch das Ende ihrer Gewinnung voraussehen.

Im Jahre 1975 erreichten die Anteile der fossilen Brennstoffe am Rohenergieaufkommen in der Welt folgende Werte: Kohle 31%, Erdöl 47%, Erdgas 19%. Die restlichen 3% entfallen auf Wasserkraft und Kernenergie. Während die Kohleförderung in den letzten Jahren die geringste Steigerungsrate aufwies, betragen nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand ihre Vorräte 80% der vermuteten und 60% der sicheren Rohenergiereserven der Welt. Die Anteile der Lagerstätten von Erdöl und Erdgas machen dagegen nur 12% der gewinnbaren Vorräte aus.

2.2.1. Feste Brennstoffe

Feste Brennstoffe sind neben Holz und Torf in erster Linie Braunkohle und Steinkohle sowie die daraus hergestellten Veredlungsprodukte Briketts und Koks (Tab. 2.2.1-1).

Feste Brennstoffe, vor allem Stein- und Braunkohle, sind die Grundlage für den Betrieb von Wärmekraftwerken (vgl. 2.1.1.).

2.2.2. Flüssige Brennstoffe

Flüssige Brennstoffe zeichnen sich durch einen hohen Heizwert (Tab. 2.2.2-1) sowie gute Transport- und Lagereigenschaften aus. Sie werden heute fast ausschließlich aus Erdöl hergestellt. Weitere Ausgangsstoffe sind Stein- und Braunkohlenteer sowie Ölschiefer. Gegenüber festen Brennstoffen bieten sie feuerungstechnische Vorteile, die die Größe und den Automatisierungsgrad der Feuerungsanlagen günstig beeinflussen.

2.2.3. Gasförmige Brennstoffe

Die gasförmigen Brennstoffe sind vom feuerungstechnischen Standpunkt aus gesehen die günstigsten Brennstoffe. Sie sind sehr reaktionsfreudig und haben ausgezeichnete Brenneigenschaften (vgl. Tab. 2.3.0-1). Gasfeuerungen sind gut regelbar und weitgehend zu automatisieren. Sie erfordern den geringsten anlagentechnischen Aufwand.

Man unterscheidet aus natürlichen Vorkommen gefördertes *Naturgas* (vgl. 1.4.) und industriell erzeugtes *Kunstgas* (vgl. 2.3.).

Tab. 2.2.2-1 *Mittlere Heizwerte der wichtigsten flüssigen Brennstoffe*

Brennstoff	Heizwert in MJ/kg
Gasöl (Dieselöl)	43
Heizöl, leicht	43
Heizöl, mittel	41
Heizöl, schwer	40

Tab. 2.2.1-1 *Wichtigste Kennziffern fester Brennstoffe in % (Mittelwerte)*

Brennstoff	im Verwendungszustand			bezogen auf Reinkohle (asche- und wasserfreie Substanz)	
	Heizwert in MJ/kg	Wassergehalt	Aschegehalt	flüchtige Bestandteile	Kohlenstoff
Holz, lufttrocken	10,5 ··· 16	20	1	70	50
Torf, lufttrocken	10,5 ··· 12	20	10	70	50
Braunkohle					
Rohkohle	6,3 ··· 12	55	10	50	68
Briketts	19 ··· 22	15	11	50	68
Braunkohlenkoks	14,5 ··· 26,5	10	12	5	93
Steinkohle					
Gasflammkohle	30,5	6	6	35	85
Fettkohle	32,5	4	6	25	88
Eßkohle	33,5	3	8	16	90
Magerkohle	33	3	8	12	90
Anthrazit	35	3	8	8	92
Steinkohlenkoks	25...30	2	9	2	97

2.3. Gaserzeugung aus Kohle und Kohlenwasserstoffen

Im Zusammenhang mit der schnellen Entwicklung der Petrolchemie und der Erschließung großer Erdgaslagerstätten setzte im internationalen Maßstab bereits vor ≈ 2 Jahrzehnten ein Strukturwandel bezüglich der Rohenergieträger für die *Stadtgaserzeugung* ein, so daß hierfür heute an Stelle von Kohle überwiegend flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe (Erdgas, Raffineriegas, Flüssiggas und Benzin) verwendet werden, sofern nicht der direkte Einsatz von Erdgas bevorzugt wird. In vielen Ländern werden auch große Anstrengungen zur Herstellung von künstlichem Erdgas (*Austauscherdgas*) aus Kohle oder Kohlenwasserstoffen zur Ergänzung der Naturerdgasversorgung unternommen.
Nach der Verbrennungswärme unterteilt man die gasförmigen Brennstoffe in *Schwachgase* (2,8 bis 14,7 MJ/m^3), *Starkgase* (16 bis 19 MJ/m^3) und *Reichgase* (25 bis 117 MJ/m^3). Einzelne Gasarten und ihre Zuordnung zeigt die Tab. 2.3.0-1.

Tab. 2.3.0-1 *Brenntechnische Gütewerte der wichtigsten gasförmigen Brennstoffe (Durchschnittswerte)*

Brennstoff	Dichteverhältnis (Luft = 1)	Verbrennungswärme in MJ/m^3	Heizwert in MJ/m^3
Schwachgase			
Koksgeneratorgas	0,90	5,0	4,2
Braunkohlengeneratorgas	0,84	6,7	6,3
Wassergas	0,52	11,5	10,5
Starkgase			
Spaltgas	0,53	17,2	16,0
Stadtgas	0,55	16,0	14,7
Reichgase			
Erdgas	0,56	bis 40,0	bis 36,0
Spaltgas	0,75	25...31,0	23,0...29,0
Erdölbegleitgas	0,60	46,2	41,9
Flüssiggas	2,0...2,7	128,0	118,0

2.3.1. Verkokung und Entgasung von Kohle

Bei der *Verkokung* und *Entgasung* wird Kohle unter Luftabschluß in Industrieöfen erhitzt, wobei Koks, Gas und Kondensationsprodukte (Teer, Rohbenzol u. a.) entstehen. Die Technologie ist in beiden Fällen die gleiche, das Produktionsziel jedoch unterschiedlich. Bei der Verkokung wird auf die Erzeugung von qualitativ hochwertigem Koks, bei der Entgasung auf die Erzielung einer maximalen Gasmenge Wert gelegt. Dementsprechend werden geeignete Kohlearten ausgewählt. Nach der bei der Erhitzung auftretenden Endtemperatur unterscheidet man:

Tieftemperaturentgasung (Schwelung) ≦ 600 °C
Mitteltemperaturentgasung 600 bis 800 °C
Hochtemperaturentgasung (Verkokung) > 800 °C

Tief- und Mitteltemperaturentgasung von Stein- und Braunkohle. Sie dient vor allem der Gewinnung flüssiger Produkte und von Schwelkoks. Es werden Steinkohlenarten verwendet, die einen hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen haben und wegen ihres geringen oder fehlenden Backvermögens nicht verkokungswürdig sind. Dabei bevorzugt man *Gasflamm-* und *Flammkohlen*, da sie neben einer hohen Teerausbeute einen Schwelkoks von ausreichender Festigkeit und gutem Reaktionsvermögen liefern.
Feinkörnige Braunkohle wird vor der Schwelung brikettiert. Das *Spülgasverfahren* hat sich gegenüber dem Heizflächenverfahren durchgesetzt, da Spülgasöfen einen größeren Kohlendurchsatz ermöglichen und mit grobkörniger oder stückiger Kohle beschickt werden können.
Die größte Verbreitung hat aufgrund seiner großen Durchsatzleistung (20 t/h) der *Lurgi-Spülgasschwelofen* gefunden. Es ist ein Doppelschachtofen mit 5,6 m × 3,0 m Querschnitt je Schacht (Abb. 2.3.1-1). Zwischen beiden Schächten liegt die Trocknerbrennkammer, die das Zusatzgas für den Trocknerkreislauf liefert. Das getrocknete Schwelgut gleitet durch Schläuche in die Schwelschächte, in die das heiße Spülgas durch Roste von unten eintritt. Im unteren Teil des Ofens wird der Koks mit kaltem Schwelgas gekühlt und ausgetragen, das Schwelgas zur Gasaufbereitung geleitet.
Hochtemperaturentgasung von Steinkohle. Die – derzeitig noch – in Gaswerken betriebenen diskontinuierlich arbeitenden *Vertikalkammeröfen*

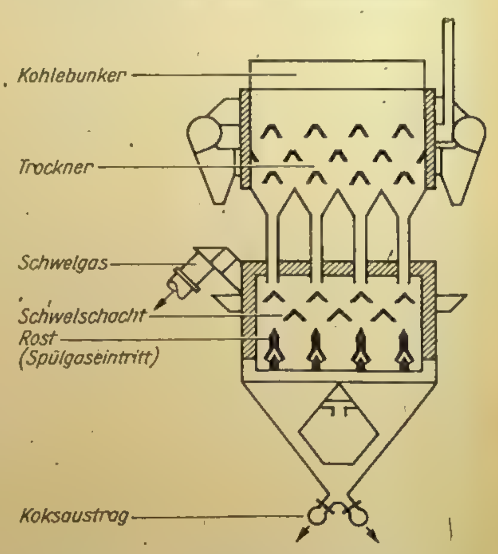


Abb. 2.3.1-1 *Lurgi-Spülgasschwelofen (nur ein Schacht im Querschnitt dargestellt)*

sind aus Feuerfestmaterial (Silika und Schamotte) aufgemauert. Die *Entgasungskammern* werden von oben je nach ihrer Größe mit 1 bis 8 t Kohle gefüllt. Zwischen den einzelnen Kammern sind Heizwände mit horizontalen Heizzügen angeordnet, in denen kontinuierlich Schwachgas verbrennt. Die notwendige Verbrennungsluft wird durch Abgas rekuperativ aufgeheizt. Das im Ofen erzeugte Rohgas wird über Teervorlagen aus den Kammern abgesaugt und in Aufbereitungsanlagen geleitet. Nach 12 bis 18 h (*Ausstehzeit*) wird der Koks unten aus den Kammern abgezogen (*Trockenbetrieb*). Von *Naßbetrieb* spricht man, wenn noch vor dem Abzug auf den glühenden Koks Wasserdampf geblasen wird. Das dabei entstehende Wassergas ergibt mit dem Entgasungsgas im entsprechenden Verhältnis gemischt Stadtgas. Vereinzelt werden auch kontinuierlich arbeitende Vertikalkammeröfen betrieben.

Hochtemperaturverkokung von Steinkohle. Zur Erzeugung von hüttenfähigem Koks werden *Horizontalkammer-Kokereiöfen* verwendet. In dem Unterofen (aus Schamottematerial) sind horizontale Verteilungskanäle und Regeneratorzellen eingebaut. Der Oberofen (aus Silika- und Schamottematerial) besteht aus 20 bis 70 Entgasungskammern und dazwischenliegenden Heizwänden mit vertikalen Heizzügen. Die Breite der Entgasungskammern beträgt 300 bis 500 mm; bei einer Höhe von 4 bis 7 m und einer Länge von 10 bis 15 m ergibt sich ein Fassungsvermögen von 10 bis 40 t Kohle je Kammer.

Um Koks bestimmter Qualität herstellen zu können, werden verschiedene Sorten Kohle in Brechern und Mühlen zerkleinert und dann miteinander vermischt. Diese *Einsatzkohle* wird aus dem Kohleturm in den verfahrbaren *Füllwagen* abgezogen, gewogen, durch Füllöcher in die Kammern gefüllt und eingeebnet. Nach der Verkokung wird der glühende Koks durch einen Stempel der Koksausdrückmaschine aus der Kammer in einen verfahrbaren *Löschwagen* gedrückt, mit Wasser oder Inertgas „abgelöscht" und auf eine schräge Rampe abgeworfen. Durch Sortieranlagen (Separation) wird dieser Mischkoks in definierte Sorten getrennt. Gassauger ziehen das bei der Verkokung entstehende Rohgas ab und fördern es durch die Aufbereitungsanlage. Zunächst wird es von 600 bis 800 °C durch Berieselung mit Ammoniakwasser auf 80 bis 120 °C abgekühlt. Dabei fällt der größte Teil des Teers durch Kondensation aus. In Kühlern wird das Gas dann weiter auf ≈ 20 °C gekühlt, wobei Teer und ammoniakhaltiges wäßriges Kondensat ausfallen. Zur Entfernung der restlichen Teernebel aus dem Gas strömt dieses durch elektrostatische *Teerscheider*, *Stoßteerscheider* oder *Venturiwascher*. Das restliche Ammoniak wird mit Wasser in *Füllkörperwaschern* oder in *Glockenboden-*, *Siebboden-* bzw. *Stufenwaschern* aus dem Gas entfernt. Eine *Trocken-* oder *Naßentschwefelungsanlage* dient zur Absonderung von Schwefel- und Zyanwasserstoff. Naphthalin wird in einer *Benzolgewinnungsanlage* mit dem Benzol durch Waschöl oder Aktivkohle aus dem Gas entfernt. Während oder nach der Aufbereitung wird dem Entgasungsgas Schwachgas zur Einstellung der geforderten Gütewerte des Stadtgases zugemischt. Das Stadtgas wird entweder über Speicherbehälter direkt ins Niederdruckgasnetz oder nach Verdichtung ins Ferngasleitungsnetz abgegeben.

Hochtemperaturverkokung von Braunkohle geschieht in der DDR in den Großkokereien Lauchhammer (Tafel 5) und Schwarze Pumpe. Die Erzeugung von *Braunkohlenhochtemperaturkoks* (*BHT-Koks*) geht von Feinkornbriketts aus, die aus asche- und schwefelarmer Braunkohle mit einer Körnung von 0 bis 1 mm hergestellt, in einem Vortrockner mit Spülgas auf ≈ 1 % Restwassergehalt vorgetrocknet und dann in die 8 m hohen, 3 m langen und 0,35 m breiten vertikalen Verkokungskammern geschüttet werden (Abb. 2.3.1-2). Die Durchlaufzeit der Briketts beträgt ≈ 12 h. Zwischen den einzelnen Kammern sind oben gasbeheizte Heizwände angeordnet. Im unteren, unbeheizten Teil der Kammer wird der Koks bereits vorgekühlt, nach periodischem Abzug in *Trockenkokskühlern* durch Inertgas völlig abgekühlt und anschließend sortiert.

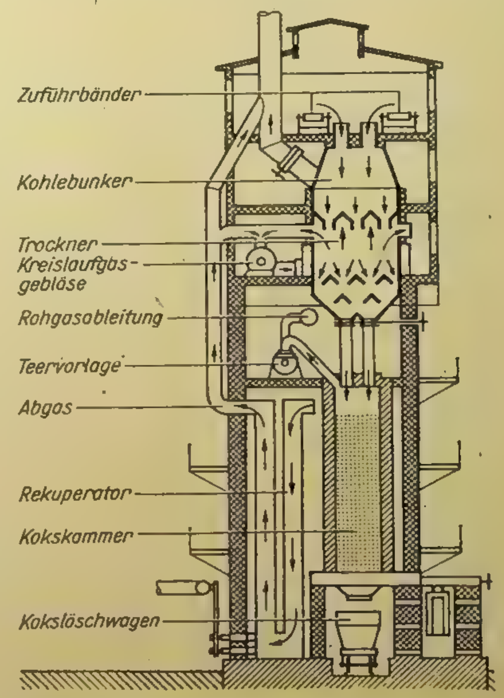


Abb. 2.3.1-2 *Braunkohlenverkokungsofen (Querschnitt)*

Die Kühlung des Entgasungsgases erfolgt in der nachgeschalteten Kondensationsanlage. Die Benzinkohlenwasserstoffe werden durch Ölwäsche und der Schwefelwasserstoff durch Trockenreinigung entfernt. Die Verminderung des CO_2-Gehalts und die Feinreinigung des Gases geschehen nach Verdichtung auf ≈ 2 MPa in der Rectisolanlage (vgl. Druckvergasung, 2.3.2.).

2.3.2. Vergasung von Kohle

In *Generatoren* wird nichtbackende Kohle kontinuierlich bei hoher Temperatur (≈ 10^3 °C) unter Zuführung eines Vergasungsmittels in der Wirbelschicht oder im Festbett nahezu restlos vergast, wobei nur Asche als Rückstand verbleibt. Es werden sowohl teerfreie Brennstoffe (Anthrazit- und Magerkohle, Steinkohlenkoks, BHT-Koks) als auch teerhaltige Brennstoffe (Gaskohle, Braunkohle, Briketts) eingesetzt, als Vergasungsmittel Luft, O_2, Wasserdampf, CO_2, H_2 oder Gemische dieser Gase verwendet. Durch Kohlevergasung wird Schwachgas für industrielle Verwendung, Wassergas für die Synthesegasherstellung, Zumischgas für die Stadtgasbereitstellung sowie Starkgas erzeugt, das aus dem Generator austretende heiße Rohgas in einigen Fällen auch direkt verfeuert. Das Gas wird normalerweise entstaubt, bei Vergasung teerreichen Brennstoffs durch elektrostatische Teerscheider zusätzlich entteert und entölt und nach – meist direkter – Wasserkühlung (zum Entfernen der kondensierbaren Bestandteile) der Nutzung zugeführt.

Von den Generatoren, die das Einsatzgut in einer Wirbelschicht vergasen, ist der *Winkler-Generator* am bekanntesten (Abb. 2.3.2-1), der wegen seiner hohen Leistungsfähigkeit zur Wassergas-

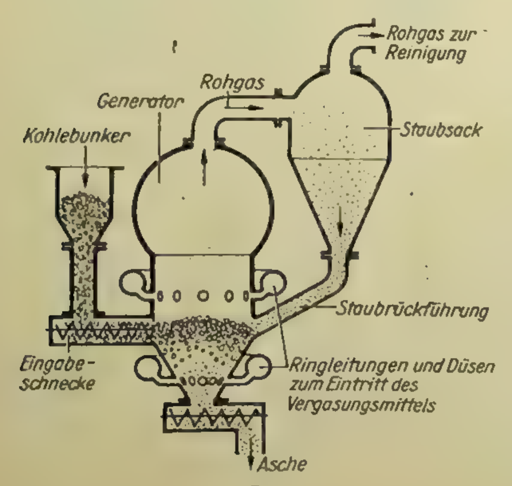


Abb. 2.3.2-1 *Winkler-Generator*

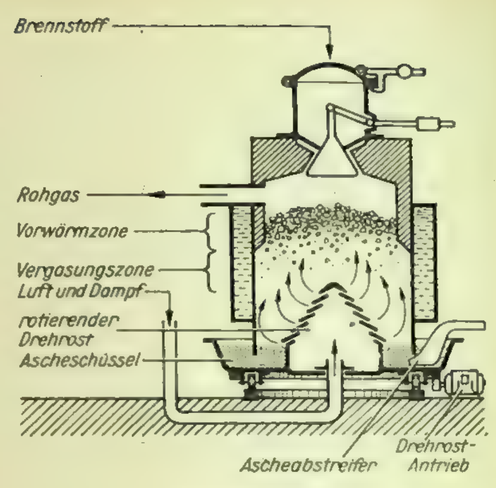


Abb. 2.3.2-2 *Drehrostgenerator*

erzeugung für die Synthesegasgewinnung in Chemiebetrieben eingesetzt wird. *Drehrostgeneratoren* (Abb. 2.3.2-2) ermöglichen durch die Rostdrehung eine gute Durchmischung des Brennstoffs mit dem Vergasungsmittel sowie einen automatischen Ascheaustrag; ihr Schachtdurchmesser liegt zwischen 1,3 und 4,0 m, ihre Höhe zwischen 5 und 9 m. *Schwelschachtgeneratoren* haben entweder einen Einhängezylinder im nach oben verlängerten Generatorschacht oder einen besonderen Schwelaufsatz. Dadurch wird teerhaltiger Brennstoff schonend vorgeschwelt, und es fällt ein qualitativ hochwertiger Schwelteer an. *Abstichgeneratoren* arbeiten mit so hoher Temperatur (≈ 1 100 °C), daß die Schlacke in flüssigem Zustand anfällt.

Niederdruckvergasung. *Generatorgas (Luftgas)* wird aus teerfreien Brennstoffen mit Luft oder einem Luft-Dampf-Gemisch als Vergasungsmittel erzeugt. Der Sauerstoff der unter dem Rost eingeführten Luft setzt sich mit dem Kohlenstoff des Kokses zu CO_2 um, das in den höhergelegenen Koksschichten zu CO reduziert wird. Durch geringen Wasserdampfzusatz zum Vergasungsmittel wird das Schmelzen der Kohleschlacke verhindert. Generatorgas besteht aus ≈ 30 Vol.-% CO, 5 Vol.-% CO_2, 10 Vol.-% H_2 und 55 Vol.-% N_2.

Wassergas wird in diskontinuierlich arbeitenden Generatoren erzeugt. Beim Gasen wird der Koks abgekühlt und muß periodisch durch Einblasen von Luft zur Verbrennung (Blasen) wieder aufgeheizt werden. Kokswassergas besteht aus ≈ 50 Vol.-% Wasserstoff, 40 Vol.-% CO und ≈ 10 Vol.-% N_2 und CO_2.

Kohlenwassergas erzeugt man aus einem teerhaltigen Brennstoff, der im Generator erst entgast und dann vergast wird. Die Entgasung beginnt bei einer Temperatur um 250 °C bereits im Oberteil des Generators. Dieses Gas hat durch einen

relativ hohen Kohlenwasserstoffanteil eine höhere Verbrennungswärme als Kokswassergas. Der Vergasungswirkungsgrad bei Niederdruckvergasung beträgt 70 bis 80%.

Druckvergasung. Ihre besonderen Merkmale sind >2 MPa Betriebsdruck sowie Verwendung von Sauerstoff und einer großen Dampfmenge oder

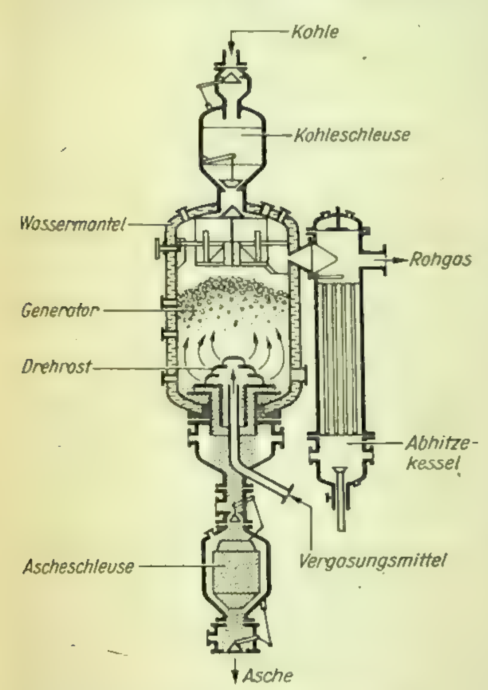


Abb. 2.3.2-3 „PKM"-Druckgasgenerator (VEB Projektierungs-, Konstruktions- und Montagebüro Kohleverarbeitung, Leipzig)

Hydriergas als Vergasungsmittel. Bei der *Dampf-Sauerstoff-Vergasung* enthält das entstehende Gas infolge des hohen Drucks eine größere Menge Methan als bei der Niederdruckvergasung. Dadurch kann besonders bei Einsatz teerhaltiger Brennstoffe Stadtgas erzeugt werden. Auch für die Druckvergasung werden Drehrostgeneratoren eingesetzt, z. B. solche der Typen Lurgi und PKM (Abb. 2.3.2-3; im Kombinat Schwarze Pumpe zur Stadtgaserzeugung installiert).

Ein Wassermantel um den Generator dient der Dampferzeugung und gleichzeitig dem Druckausgleich für den inneren Generatormantel. Auch das Nachfüllen der Kohle und das Abziehen der Asche geschehen unter Druck. Das den Generator mit ≈ 400 °C verlassende Rohgas wird zur Wärmeausnutzung durch Abhitzekessel geleitet und anschließend aufbereitet: Durch *Kondensation* und *Druckölwäsche* werden zunächst die kondensierbaren Bestandteile (Teer, Öl u. a.) entfernt. Die weitere Gasaufbereitung geschieht dann entweder durch *Druckwasserwäsche* (Senken des CO_2-Gehalts), *Trockenreinigung* (Entfernen des Schwefelwasserstoffs) und *Gastrocknung* oder nach dem *Rectisolverfahren*. Dabei wird das Gas mit Wasser und einem organischen Waschmittel (z. B. Methanol) in mehreren Stufen bei einer Temperatur bis −70 °C gewaschen.

Der Vergasungswirkungsgrad der Dampf-Sauerstoff-Vergasung liegt bei mehr als 80%.

Aussichtsreichstes Verfahren zur Erzeugung von *Austauscherdgas* aus Kohle ist die *hydrierende Vergasung*. Beim amerikanischen *Hygasverfahren* [Hydrogasification] (Abb. 2.3.2-4) wird feinkörnig aufbereitete Einsatzkohle mit Öl oder

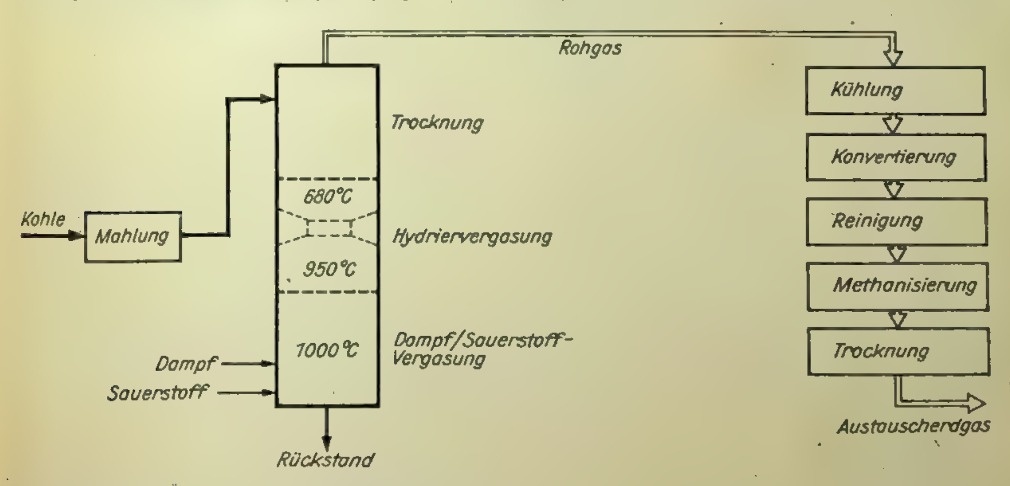


Abb. 2.3.2-4 Hygas-Verfahren zur Kohlevergasung

Wasser gemischt und in den *Hydrovergaser* gefördert. Nach dem Abdampfen der Flüssigkeit wird die Kohle in 2 Stufen unter einem Druck von 6,9 MPa durch das in der untersten Verfahrensstufe (Dampf-Sauerstoffvergasung) erzeugte wasserstoffreiche Hydriergas im Wirbelbett vergast. Nach der Gasaufbereitung hat das Austauscherdgas, auch als *SNG* [*S*ubstitute *N*atural *G*as] bezeichnet, eine Verbrennungswärme von 38 MJ/m³. Der Vergasungswirkungsgrad des Verfahrens liegt bei mehr als 95 %.
Die *Untertagevergasung* ist eine in verschiedenen Staaten angewandte Sonderform der Druckvergasung zur Energiegewinnung aus nicht abbauwürdiger Kohle (vgl. 1.3.3.).

2.3.3. Gaserzeugung durch Spaltvergasung flüssiger und gasförmiger Kohlenwasserstoffe

Die Umsetzung von Kohlenwasserstoffen zu *Stadtgas* erfolgt durch thermische oder thermisch-katalytische Spaltung mit Luft oder Sauerstoff, mit Wasserdampf oder mit Wasserdampf und Luft bzw. Sauerstoff in einem *Reaktor*. Durch Anwendung eines geeigneten Katalysators werden die Reaktionen gesteuert und beschleunigt, es ist eine geringere Prozeßtemperatur erforderlich als bei der rein thermischen Umsetzung, und der Gesamtwirkungsgrad wird erhöht. Der technologische Aufbau der *Spaltanlage* wird hauptsächlich von der Art des Einsatzstoffs (Heizöl, Benzin, Flüssiggas, Erdgas) und dem Produktionsziel bestimmt. Durch technische Veränderungen können in einer Anlage verschiedene Einsatzstoffe vergast werden.
Diskontinuierliche (zyklische) Spaltgaserzeugung. Man arbeitet mit ≈ 50 kPa Überdruck. Die Bereitstellung der für die Umsetzung benötigten Reaktionswärme geschieht periodisch, d. h., die während einer *Gaseperiode* verbrauchte Wärme wird in einer gesonderten *Heizperiode* wieder zugeführt und gespeichert. Heiz- und Gaseperiode sind jeweils durch eine kurze Spülperiode getrennt, in der Restgase der vorhergehenden Periode mittels Wasserdampf aus der Anlage gespült werden. Die Spaltanlagen sind mit automatischer Prozeßsteuerung ausgerüstet.
In der DDR sind derartige Anlagen in 5 Gaswerken vorhanden; sie arbeiten mit thermisch-katalytischer Spaltung am Festbett. Einsatzstoffe sind Flüssiggas, Benzin und Erdgas.
Kontinuierliche Spaltgaserzeugung. Hier erfolgt die Zuführung der Reaktionswärme kontinuierlich, und zwar bei thermischer Umsetzung durch partielle Oxydation (Teilverbrennung) des Einsatzstoffs mit Luft, Sauerstoff oder einem Sauerstoff-Luft-Gemisch, bei der thermisch-katalytischen Umsetzung durch äußere Beheizung des Reaktionsraums.

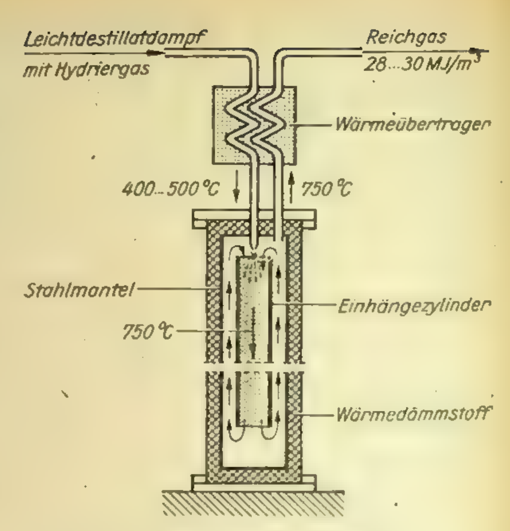


Abb. 2.3.3-1 Gaskreislaufhydrierer

Bevorzugt werden Hochdruckverfahren, da sie eine größere Leistung als Niederdruckverfahren aufweisen und das Gas – ohne die beim Niederdruckverfahren erforderliche Nachverdichtung – am Ausgang der Anlage mit dem zur Verteilung notwendigen Druck zur Verfügung steht (bis zu 5,4 MPa Überdruck).
Thermische Hochdruckspaltung. Durch partielle Oxydation des Einsatzstoffs mit Sauerstoff und Wasserdampf bei ≈ 3 MPa Überdruck und 1 100 °C Temperatur wird Schwachgas erzeugt und durch Zumischung eines Karburiermittels (z. B. Erdgas, s. u.) die Verbrennungswärme des Stadtgases erreicht. Nach diesem Verfahren können alle Kohlenwasserstoffe umgeformt werden.
Thermisch-katalytische Hochdruckspaltung. Als Einsatzstoffe werden vorwiegend leichte Kohlenwasserstoffe verwendet. Hier sei als Beispiel die zweistufige Umsetzung von Benzin in Stadtgas in einer ICI-Spaltanlage erläutert (von der britischen *I*mperial *C*hemical *I*ndustries entwickelt). Das Benzin wird bei 400 °C verdampft, entschwefelt und nach Dampfzugabe im *Röhren(spalt)ofen* (Reaktor) bei ≈ 700 °C und 2,6 MPa gespalten. Im Reaktor sind 36 Spaltrohre aus Chrom-Nickel-Stahl aufgehängt, die den nickelhaltigen Katalysator enthalten und von außen beheizt werden. Das erzeugte Schwachgas (1. Stufe) wird nach *Konvertierung* (Umwandlung des CO mit Hilfe von Wasserdampf in CO_2 und H_2) und Zumischung von Flüssiggas o. a. Kohlenwasserstoffen (*Karburierung*, 2. Stufe) als Stadtgas abgegeben. Anstatt mit Flüssiggas kann das Schwachgas auch mit Reichgas aus einem *Gaskreislaufhydrierer* angereichert werden, um die Stadtgasverbrennungswärme zu erreichen (Abb. 2.3.3-1). Dabei wird ein Teil des konvertierten Schwachgases nach CO_2-Auswaschung als Hydriergas für die hydrierende

Vergasung von Leichtdestillat (Flüssiggas, Benzin o. a.). verwendet.
Alle Anlagen zur Spaltvergasung von Kohlenwasserstoffen weisen eine hohe Betriebsbereitschaft und Flexibilität der Leistung auf; sie sind allgemein in Grenzen von 60 bis 110% der Nennleistung ohne bedeutende Wirkungsgradverschlechterung ($\eta_{therm} \approx 90\%$) und bei Einhaltung der geforderten Gasqualität belastbar. Vergasungs- und Spaltanlagen kommen auch in der chemischen Industrie zur Erzeugung eines Gases mit hohem Wasserstoffgehalt (*Synthesegas*) zum Einsatz, wobei das Vergasungs- oder Spaltgas dem Verwendungszweck entsprechend aufbereitet wird.
Die Umsetzung von flüssigen Kohlenwasserstoffen zur Erzeugung von *Austauscherdgas* kann durch *Methanisierung* von Spaltgas oder Hydrierung der Einsatzstoffe oder durch Kombination beider Verfahrensstufen erfolgen. Eine Methode zur Vergasung leichter flüssiger Kohlenwasserstoffe stellt der bereits genannte Gaskreislaufhydrierer dar. Zur Erzeugung von Austauscherdgas aus flüssigen Kohlenwasserstoffen wurde jedoch vor allem das bisher zur Stadtgaserzeugung eingesetzte britische *CRG-Verfahren* [Catalytic Rich Gas] weiterentwickelt. Dabei wird entweder eine zweite Methanisierungsstufe oder eine Hydriervergasungsstufe in das Verfahren eingeordnet. Gegenüber der Methanisierung hat sich die Einfügung der Verfahrensstufe

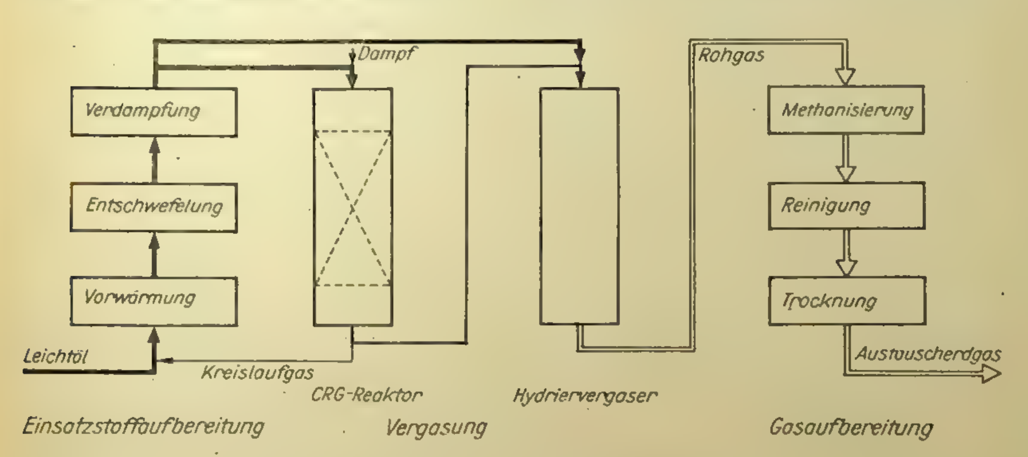


Abb. 2.3.3-2 *CRG-Verfahren zur Vergasung flüssiger Kohlenwasserstoffe*

zur *hydrierenden Vergasung* als wirtschaftlicher erwiesen (Abb. 2.3.3-2). Ein Teilstrom des Einsatzstoffs wird nach der Aufbereitung mit Wasserdampf im CRG-Reaktor katalytisch zu einem wasserstoffhaltigen Starkgas umgesetzt, das als Hydriergas zur Umformung des zweiten Teilstroms des Einsatzstoffs benötigt wird. Ein geringer Teil des Starkgases wird im Kreislauf zur Aufbereitung des Einsatzstoffs zurückgeführt. Das Verfahren arbeitet bei Temperaturen um

450°C und Drücken um 4 MPa. Verfahren zur Erzeugung von Austauscherdgas aus Schwerölen mit hohem Schwefelgehalt durch *Wirbelschicht-Hydriervergasung* befinden sich in Entwicklung. Erfolgversprechend sind auch amerikanische Verfahrensentwicklungen zur Erzeugung von Austauscherdgas aus Ölschiefer durch zweistufige hydrierende Vergasung bei ≈ 500°C und 750°C und Drücken bis zu 9 MPa. Durch Variation der Aufheizgeschwindigkeit des Einsatzstoffs kann entweder mehr Öl (langsame Aufheizung) oder mehr Gas (schnelle Aufheizung) erzeugt werden.
Zur wirtschaftlichen Verwertung von Abfallstoffen und Reinhaltung der Biosphäre wurden Verfahren zur *Müllvergasung* entwickelt und erste Anlagen dieser Art in Dänemark und den USA bereits in Betrieb genommen. Besonders aussichtsreich und wirtschaftlich ist das *IGT-Biogas-Verfahren* [Institute of Gas Technology, USA], bei dem durch anaerobe Zersetzung der organischen Substanz bis zu 280 m^3 Reichgas pro Tonne Müll gewonnen werden können. Anorganische Materialien werden vor der Behandlung ausgesondert. Es sind einige Varianten dieses Verfahrens in Entwicklung, die im wesentlichen 2 Stufen beinhalten: Zersetzung der organischen Substanz durch säurebildende Bakterien in der ersten Stufe und Umformung der Zwischenprodukte durch methanbildende Bakterien zu Brenngas in der zweiten Stufe (50 bis 80 Vol.-% Methan, 20 bis 50 Vol.-% Kohlendioxid).
Eine Möglichkeit der kurzfristigen Bereitstellung von Erdgas zur Deckung von Gasbedarfsspitzen in Erdgasversorgungssystemen stellt die Wiederverdampfung von *Flüssigerdgas*, auch als *LNG* [Liquified Natural Gas] bezeichnet, dar (vgl. 2.4.4.).

2.4. Rohrfernleitungen und Gasspeicherung

2.4.1. Die Bedeutung von Öl- und Gasfernleitungen

Rohrfernleitungen für Erdöl und Erdgas dienen dem Transport aus den Fördergebieten in die z. T. mehrere tausend Kilometer entfernten Verbraucher- bzw. Verarbeitungszentren. In zunehmendem Maße werden große internationale Rohrfernleitungen gebaut.
Die Vorteile des Rohrleitungstransports sind geringe Transportkosten, hohe Betriebssicherheit, Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen, keine zusätzliche Belastung oberirdischer Transportwege und die Möglichkeit der Verlegung in Gebieten, die für andere Transportarten unzugänglich sind.
Die Gesamtstrecke des Rohrleitungsnetzes in der Welt beträgt ≈ 2 Mio km. Jährlich werden ≈ 40 000 bis 50 000 km Rohrfernleitungen gebaut, davon entfallen allein auf die UdSSR ≈ 15 000 km/a.
In der DDR besteht neben Erdöl- und Produktenleitungen ein stark vermaschtes *Gasverbundnetz* für den Transport von in wenigen großen Werken, z. B. Schwarze Pumpe, erzeugtem Stadtgas, von eigenem Erdgas und Importerdgas aus der UdSSR. Aufgrund des Umfangs des Gastransports und der geringeren Transportentfernungen hat es nur einen maximalen Rohrdurchmesser von 900 mm und Betriebsdrücke von 5,4 MPa. Für die Einspeisung in Ortsverteilungsnetze bzw. für die Versorgung von Großabnehmern werden *Druckregleranlagen* eingesetzt, die den hohen Ferngasleitungsdruck reduzieren und auf konstante Verbraucherdrücke einregeln. Die Druckregler benötigen keine Fremdenergie, sie werden vom Gasdruck gesteuert.

2.4.2. Auslegung und Ausrüstungen von Rohrfernleitungen

Rohrfernleitungen sind überwiegend in der Erde mit etwa 1 m Überdeckung verlegt. Sie werden gegenwärtig mit maximalen Rohrdurchmessern von 1 400 mm für maximale Betriebsdrücke von 7,5 MPa gebaut. Die Transportkapazität einer solchen Leitung beträgt ≈ 70 Mio t/a Erdöl bzw. 28 Mrd. m^3/a Erdgas. Zum Einsatz gelangen längs- oder spiralgeschweißte Stahlrohre, wobei insbesondere für die großen Nennweiten zunehmend hochfeste Rohrstähle (Streckgrenzensteigerung von 350 MPa auf 480 MPa) verarbeitet werden. An der Entwicklung von Großrohrleitungen mit Durchmessern bis 3 000 mm und dafür erforderlichen neuen Bau- und Montagetechnologien wird gearbeitet.
Der Rohrleitungstransport von verflüssigtem Erdgas bei −161 °C wird erforscht. Durch diese Technologie könnten wesentlich größere Mengen transportiert werden (vgl. 2.4.4.).
Pump- und Verdichterstationen. Bei Ölfernleitungen müssen zum Ausgleich des Druckverlusts *Zwischenpumpstationen* in Abständen von 100 bis 250 km längs der Leitung installiert werden. In gleicher Weise ist bei Erdgasfernleitungen zur Erreichung wirtschaftlicher Förderleistungen die mehrmalige Zwischenverdichtung des Gases erforderlich. Die optimalen Abstände der *Zwischenverdichterstationen* betragen 90 bis 120 km. Als Verdichteraggregate werden vorwiegend Kreiselverdichter mit Gasturbinenantrieb verwendet, die benötigte Verdichtungsenergie kann damit direkt aus dem Gas der Transportleitung genommen werden. Die Leistungen der Verdichteraggregate betragen 6 000 bis 15 000 kW, größere Aggregate mit 25 000 bis 40 000 kW sind in Entwicklung.
Armaturen sind für den Betrieb und die Sicherheit von Ferngasleitungen notwendig. Am wichtigsten sind Absperrorgane, wie *Schieber* oder *Kugelhähne*, und Molchschleusen zur Einführung von Reinigungs- oder Lecksuchmolchen während des Betriebs.
Sicherheit von Ölfernleitungen. An Ölfernleitungen werden besonders im Hinblick auf den Grundwasserschutz hohe Sicherheitsanforderungen gestellt. Zur Feststellung von Lecks werden verschiedene Verfahren mit hoher Empfindlichkeit, z. B. automatischer Vergleich der Soll- und Ist-Werte des Druckverlaufs und der Mengenströme entlang der Leitung, angewendet. Weiterhin werden während des Betriebs *Lecksuchmolche*, die mit dem Ölstrom mitgeführt werden, über *Molchschleusen* in die Leitung eingebracht. Diese orten durch elektromagnetische Messungen bzw. durch Registrierung von an Lecks auftretenden Ausströmgeräuschen und wegabhängiger Aufzeichnung der Signale auf Magnetband während des Molchdurchlaufs auch kleinste Lecks bzw. unzulässige Veränderungen an der Leitung.

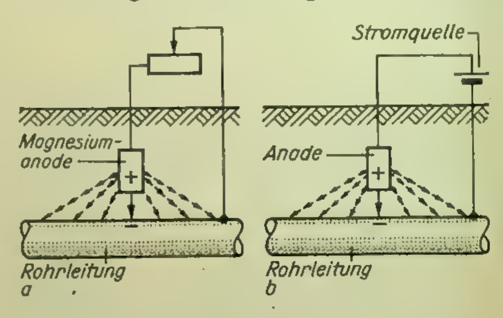


Abb. 2.4.2-1 a Katodenschutz einer Rohrleitung durch galvanische Schutzanode und b durch Fremdstrom

Korrosionsschutz. Fernrohrleitungen unterliegen der Außenkorrosion durch das umgebende Erdreich. Sie sind daher außen mit einer entsprechenden *Bitumen-* oder *Plastbindenisolierung* geschützt, die entweder im Rohrwerk oder durch besondere Isoliermaschinen bei der Verlegung aufgebracht wird. Zusätzlich wird die verlegte Rohrleitung katodisch geschützt. Der als Katode geschalteten Rohrleitung wird Gleichstrom zugeführt und dadurch elektrochemische Korrosion weitgehend unterbunden (vgl. 8.8.2.). Dabei können galvanische Anoden (Abb. 2.4.2-1a) oder bei größeren Leitungen fremdstromgespeiste Anlagen (Abb. 2.4.2-1b) verwendet werden.

2.4.3. Bau von Rohrfernleitungen

Technologischer Ablauf. Nach den Gewerken Trassenvorbereitung und Rohrtransport werden die längs der Trasse ausgefahrenen Rohre vorgestreckt, d. h. Anpassen der Rohre an den Strang und Schweißen der ersten Schweißlage, der Wurzellage. Zum Anpassen der Rohre an den Strang werden hydraulische oder pneumatische *Innenzentriervorrichtungen* verwendet, die durch Anpressen von 2 Backenreihen an der Rohrinnenwand den Rohrstoß für die nachfolgende Wurzelschweißung fixieren. Das Vorstrecken ist der für den Baufortschritt bestimmende Arbeitsgang. Danach werden die Füll- und Decklagen geschweißt. Bei großen Leitungen arbeiten dabei bis zu 4 Schweißer gleichzeitig an einem Rohrstoß. Die fertiggestellten Schweißnähte werden zerstörungsfrei geprüft (Ultraschall, Isotopenstrahlung, vgl. 13.3.2.). Nachfolgend wird der Rohrgraben neben dem montierten Strang ausgebaggert. Danach wird der Rohrstrang mit 4 bis 6 Rohrlegekränen in den Rohrgraben abgesenkt und verfüllt (Tafel 10). Unisolierte Rohre werden bei diesem Arbeitsgang durch eine auf dem Rohr fahrende Isoliermaschine isoliert. Sämtliche Montagearbeiten, die nicht im normalen Vorstreck- und Schweißtakt hergestellt werden können, werden als rückwärtige Verbindungen durchgeführt, z. B. Einbau von Bogen, Kreuzung von Verkehrswegen und Gewässern, Strangverbindungen, Montage von Molchschleusen und Absperrarmaturen. Den Abschluß der Arbeiten bildet die Hauptdruckprüfung.

Der Bau großkalibriger Fernrohrleitungen der Nennweite 1400 mm mit Wanddicken von 16,5 bis 25 mm aus hochfestem Stahl stellt besondere Anforderungen an die Bau- und Montagetechnologie. Die großen Massen der Einzelrohre und Armaturen erfordern den Einsatz der schwersten z. Z. hergestellten Rohrlegekräne mit 600 bis 900 kN Tragfähigkeit.

Schweißtechnologie. Die Schweißtechnologie als Kernstück der Bau- und Montagetechnologie bestimmt den Baufortschritt. Die für die Verbindung der Einzelrohre zum fortlaufenden Strang notwendigen Montageschweißnähte müssen in Zwangslage (am feststehenden Rohrstoß) hergestellt werden. Dominierend ist das Elektrodenhandschweißen in fallender Richtung mit sog. zelluloseumhüllten Hochleistungselektroden. In zunehmendem Maße kommt das *Schutzgasschweißen* mit Kurzlichtbogen mit automatischer Schweißdrahtzufuhr zum Einsatz, mit Handpistole oder, besonders vorteilhaft für das Füll- und Decklagenschweißen, mit *Rohrumlaufschweißautomaten*, z. B. Schweißautomat ZIS 453. Seit einigen Jahren wird an der Entwicklung kompletter Schweißautomatensysteme für die Herstellung der Montagenähte gearbeitet. Zur Verringerung des Umfangs der Zwangslagenschweißung wird insbesondere bei großen Rohrleitungen die Vorfertigung von Rohrsektionen auf *Schweißbasen* angewendet. Das Schweißen erfolgt hier am gedrehten Rohrstoß mit automatischen Hochleistungsschweißverfahren. Die Länge der Sektionen von 24 bis 48 m (2 bis 4 Einzelrohre) ermöglicht eine wesentliche Steigerung des Baufortschritts. Der Schweißbasenbetrieb ist jedoch mit erhöhtem Aufwand an Transport- und Umschlagarbeiten verbunden.

2.4.4. Gasspeicherung

Voraussetzung für eine wirtschaftliche Fahrweise der großen Gaserzeugungsstätten ist eine kontinuierliche Gasproduktion und für die optimale Auslastung langer Erdgasfernleitungen eine gleichbleibende Transportleistung. Dieser kontinuierlichen Gasbereitstellung steht die diskontinuierliche Abnahme der Verbraucher gegenüber, die sowohl innerhalb einer Woche (verringerter Gasbedarf am Wochenende) als auch während eines Jahres (Heizgasbedarf im Winter) auftritt. Der Vorteil des Energieträgers Gas besteht u. a. darin, daß er in Zeiten geringer Abnahme gespeichert und in Spitzenbedarfszeiten wieder ins Netz eingespeist werden kann. Leistungsfähige Speicheranlagen können darüber hinaus auch die Funktion von Havariespeichern erfüllen, die bei Ausfall von Produktionsanlagen und Rohrfernleitungen die Versorgung weitgehend sichern.

Gasbehälter. Örtliche *Niederdruckgasbehälter* sind nur noch von untergeordneter Bedeutung.

Netzspeicherung. Durch gesteuertes Auf- und Abfahren der Drücke in einem Gasverbundnetz ist ein Speicherausgleich über kurze Zeiträume, wie tägliche und wöchentliche Bedarfsschwankungen, gut möglich. Die Nutzung des Leitungsvolumens als Speicher kommt nur bei Netzen mit Transport- und Verteilungsfunktion in Frage. Ausgesprochene Transportleitungen, insbesondere über größere Entfernungen, müssen zu ihrer

optimalen Auslastung gleichmäßig gefahren werden.

Unterirdische Gasspeicherung. Die wirtschaftlichste Art ist die Einlagerung in ausgebeuteten Erdöl- und Erdgaslagerstätten. Eine weitere Möglichkeit bietet die Lagerung großer Gasmengen in *Aquiferspeichern* mit Speicherkapazitäten von einigen 10^8 bis 10^9 m^3. Hierbei wird Gas in porösen Gesteins- oder Sandschichten eingelagert, die ursprünglich mit Wasser gesättigt waren, das durch das eingespeiste Gas verdrängt wurde. Neben einer porösen Speicherformation ist für diese Speicherung auch eine absolut gasundurchlässige Deckschicht erforderlich (Abb. 2.4.4-1). Die Ausspeiseleistung von Aquiferspeichern ist jedoch begrenzt, sie beträgt pro Tag ≈ 1% des gespeicherten Gasvolumens und kann nur kurzzeitig höher gefahren werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Speicherung in *Salzkavernen* (Abb. 2.4.4-2), die man durch

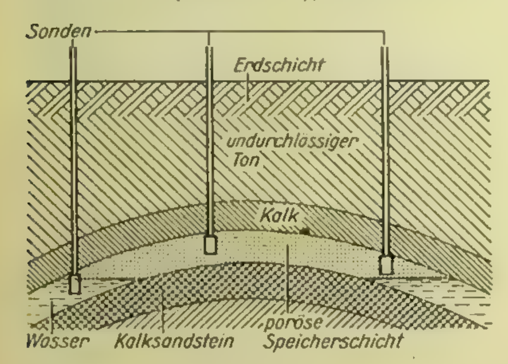


Abb. 2.4.4-1 *Aquiferspeicher*

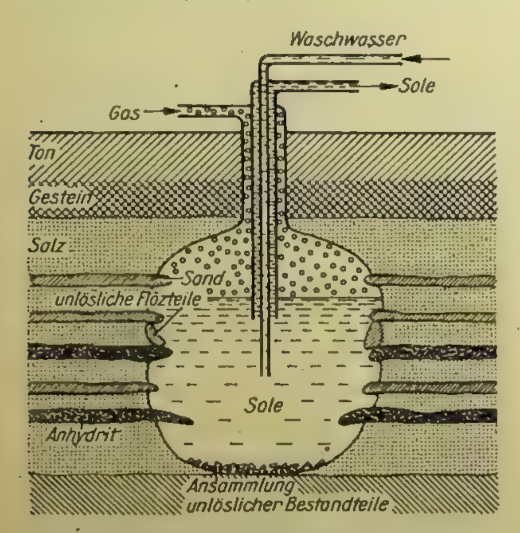


Abb. 2.4.4-2 *In einem Salzlager ausgelaugte Kaverne als Untergrundgasspeicher*

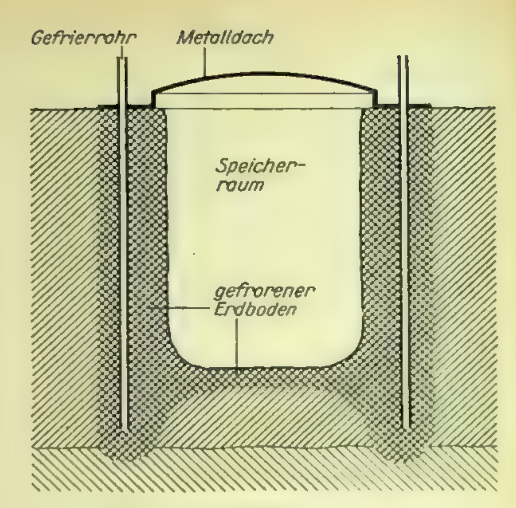


Abb. 2.4.4-3 *Grundspeicher*

Auslaugen geeigneter Salzstöcke oder -lagerstätten mit Wasser von der Erdoberfläche aus mit einem geometrischen Volumen von 10^4 bis 10^5 m^3 schaffen kann. Im aufgedrückten Zustand können einige 10^6 m^3 Gas gespeichert werden. Salzkavernen können hohe Ausspeiseleistungen haben und sind daher besonders gut auch als Havariespeicher geeignet.

Flüssigerdgasspeicherung. Erdgas kann auch in flüssigem Zustand bei −161 °C gespeichert werden. Es liegt hierbei drucklos als siedende Flüssigkeit vor. Die Ausspeisung erfolgt über Kreiselpumpen, die das Flüssigerdgas auf den für die Fortleitung erforderlichen Druck bringen. Das unter Druck stehende Flüssigerdgas wird anschließend verdampft. Mit dieser Technologie können mit relativ wenig Aufwand sehr hohe Ausspeiseleistungen realisiert werden. Das Flüssigerdgas nimmt nur $^1/_{625}$ seines Volumens im gasförmigen Zustand ein. Dadurch können in relativ kleinen Speicherräumen große Gasmengen gespeichert werden, z. B. in einem 50000 m^3-Behälter ≈ $3 \cdot 10^7$ m^3 Gas. Solche Anlagen sind vorwiegend als Havariespeicher und zum Ausgleich der maximalen Winterspitze geeignet. Als Speicherbehälter werden doppelwandige isolierte Metallbehälter, *Grund-* (Abb. 2.4.4-3) oder *Betonspeicher*, gebaut. Durch Wärmeeinstrahlung verdampft ständig ein kleiner Teil des Flüssigerdgases und muß rückverflüssigt werden.

2.5. Erzeugung von Kraftstoffen

Kraftstoffe sind Gemische verschiedener *Kohlenwasserstoffverbindungen*. Sie werden überwiegend aus Erdöl gewonnen. Ihre Herstellung aus Kohle hat wegen der wirtschaftlichen Nachteile an Bedeutung verloren.

Die Erdölverarbeitungsbetriebe (Tafel 17) in der Welt unterscheiden sich infolge der jeweiligen Erdölqualität, des Alters der Anlagen und ihres Produktionsprogramms. Es gibt jedoch einige grundlegende Strukturen, die in jedem Werk zu erkennen sind.

2.5.1. Destillation des Erdöls

Die erste Verarbeitungsstufe ist die *fraktionierte Destillation*, bei der die im Erdöl vorhandenen Kohlenwasserstoffe in Molekülgruppen entsprechend ihrer Siedebereiche aufgetrennt werden.

Das entsalzte (Tafel 17) und entwässerte Rohöl wird in einem *Röhrenofen* unter Druck auf ≈ 350 °C erwärmt und in eine *Stabilisierungskolonne* (Abb. 2.5.1-1) geleitet, wo die am leichtesten siedenden Fraktionen unter einem Druck von 0,4 bis 1 MPa abdestilliert werden. Dabei wird der Druck in der Kolonne so weit abgesenkt, daß die leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe CH_4 bis C_4H_{10}, deren Siedetemperatur bei Umgebungsdruck unter 40 °C liegt, verdampfen. Die verdampften Anteile entweichen am oberen Ende der Kolonne, ihrem Top, und werden deshalb als *Topdestillat* bezeichnet, während das Öl am Fuß abfließt und im unteren Drittel der Kolonne für *atmosphärische Destillation* eingespeist wird. Durch Entspannen des Öls auf den atmosphärischen Druck von 0,1 MPa verdampfen die Bestandteile mit einem Siedepunkt unter 350 °C. Unterhalb des Rohöls eingeblasener

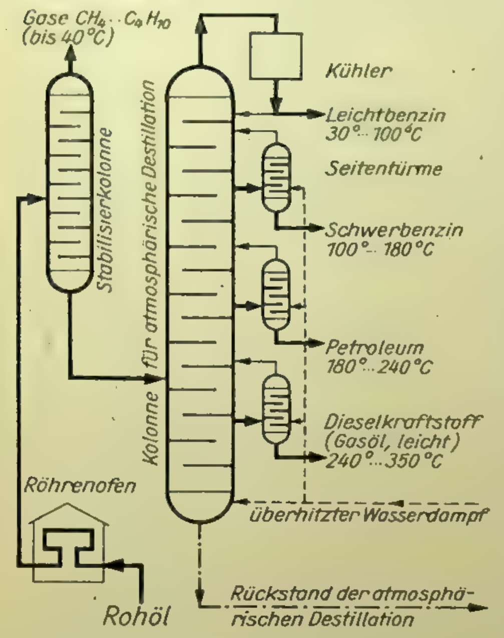


Abb. 2.5.1-1 ***Erdöldestillation, Kolonne für atmosphärische Destillation***

Wasserdampf zieht diese Dämpfe mit nach oben; dabei kühlen sie sich ab. Entsprechend ihrer Siedepunkte gehen die einzelnen Fraktionen wieder in den flüssigen Zustand über. Auf den Glockenböden, die die Destillationskolonne in mehrere übereinanderliegende Kammern teilen, findet diese Fraktionierung durch wiederholte Verdampfung und Kondensation statt. Der bis 350 °C nicht verdampfte Teil des Erdöls fließt nach unten in den Sumpf ab und verläßt die Kolonne als atmosphärischer Rückstand. Als Topdestillat der atmosphärischen Destillation fällt neben Wasserdampf *Leichtbenzin* an, das in einem Kühler kondensiert und z. T. in die Kolonne zurückgepumpt wird, um auf den tiefer liegenden Böden die ständige Kondensation und Verdampfung anzuregen. Die anderen Fraktionen werden von bestimmten Böden in einer ihrem Siedebereich entsprechenden Höhe seitlich aus der Kolonne abgeführt. In Seitentürmen, den sog. *Strippern*, werden in ihnen noch enthaltene leichter siedende Bestandteile mit Wasserdampf ausgetrieben und oberhalb der Entnahmestelle dem Hauptturm wieder zugeführt. Der atmosphärische Rückstand kann nach erneutem Erwärmen in die *Vakuumkolonne* eingespeist werden. Da sich die Moleküle im Erdöl bei Temperaturen um 400 °C zersetzen, der Siedepunkt von Schmierölen aber höher liegt, wird bei der *Vakuumdestillation* der Druck so weit herabgesetzt, daß die Siedetemperatur um 100 bis 150 °C niedriger liegt als bei atmosphärischem Druck. Dabei fallen an: als Topdestillat *schweres Gasöl*, als Seitenfraktionen Ausgangsprodukte für die Herstellung von *Schmierölen* und als Rückstand *Bitumen*, das ebenfalls später aufgearbeitet wird.

2.5.2. Raffination der Destillationsprodukte

Die Fraktionen der Erdöldestillation, aus denen Kraftstoffe hergestellt werden, enthalten noch Schwefel-, Sauerstoff- und Stickstoffverbindungen sowie ungesättigte Kohlenwasserstoffe, die den schlechten Geruch und die dunkle Farbe der Destillationsprodukte verursachen und die in den weiteren Verarbeitungsstufen die erforderlichen wertvollen Katalysatoren unwirksam machen würden. Außerdem würde bei der Verbrennung der Schwefelverbindungen im Motor schweflige Säure entstehen, die die Motorwerkstoffe zerstört. Deshalb werden diese Verbindungen mit Hilfe physikalischer und chemischer Raffinationsverfahren entfernt oder so umgewandelt, daß sie keinen nachteiligen Einfluß ausüben.

Mit konzentrierter Schwefelsäure entfernt man die ungesättigten und leicht harzenden Stoffe sowie Farb- und Riechstoffe. Aktivkohlefilter

und Kieselsäuregel halten unangenehm riechende Beimischungen zurück. Beim Durchlaufen von Filterpressen, die mit Bleicherde gefüllt sind, werden die Destillationsprodukte aufgehellt.
Zur *Entschwefelung* dient die *katalytische Druckwasserstoff-Raffination*. Dabei leitet man die Destillationsprodukte in Dampfform unter Druck bei 350 bis 500°C zusammen mit Wasserstoff über Kobalt-Molybdän-Bauxit- oder Bleicherdekatalysatoren, wodurch die Schwefel-Kohlenstoff-Bindungen aufgespalten und die frei werdenden Valenzen durch Wasserstoffatome besetzt werden. Der entstehende Schwefelwasserstoff wird aus den kondensierten Produkten durch Waschen mit Natronlauge extrahiert.

2.5.3. Hauptprodukte der Erdölaufbereitung

Flüssiggas. Diese bei Umgebungsbedingungen gasförmigen, aber unter Druck kondensierbaren Kohlenwasserstoffe mit 3 und 4 Kohlenstoffatomen, die auch noch geringe Mengen an Kohlenwasserstoffen mit 2 und 5 Kohlenstoffatomen enthalten können, fallen als Topdestillat der Stabilisierungskolonne und bei nachfolgenden Verarbeitungsstufen anderer Fraktionen an. Ist Flüssiggas in beliebigem Mischungsverhältnis abzusetzen, wird es ohne weitere Verarbeitung in Stahlflaschen abgefüllt oder in Druckkesselwagen verladen und den Verbrauchern zugeführt. Es dient vor allem zum Kochen und Heizen für Haushalt und Camping, als Rohstoff für Spitzengaswerke und die Olefingewinnung, als Mischkomponente für Raffinerieheizgas und zur Erzeugung von Synthesegas.
Oft werden jedoch alle in einem Erdölverarbeitungswerk anfallenden Gase gesammelt und in einer Gastrennanlage durch Destillation weitgehend aufgetrennt. Die Hauptprodukte der Raffineriegastrennung sind Propan C_3H_8 und Butan C_4H_{10}. Dadurch stehen Propan noch für Lösungs-, Fällungs- und Kältemittel sowie für die Schmierstoffherstellung und Butan für die Herstellung von Alkylatbenzin (vgl. 2.5.5.) zur Verfügung.
Benzin. Die Rohbenzine haben einen Siedebereich zwischen 30 und 180°C. Sie werden nach der Siedetemperatur in Gas-, Leicht-, Mittel- und Schwerbenzin unterteilt. Der größte Teil des Rohbenzins wird zu Vergaserkraftstoffen für Ottomotoren aufgearbeitet. In erster Linie ist dabei die *Klopffestigkeit* zu erhöhen, d. h. der Widerstand gegen das vorzeitige Selbstentzünden des Kraftstoff-Luft-Gemischs bei der Verdichtung im Motor, das einen hohen Energieverlust und ein klopfähnliches Geräusch im Motor zur Folge hat.
Als Kenngröße der Klopffestigkeit dient die *Oktanzahl*, wobei je nach Prüfmotor zwischen der *Research-Oktanzahl* (*ROZ*), nach der auch die Qualität des Benzins in der DDR bestimmt wird, und der *Motor-Oktanzahl* (*MOZ*) unterschieden wird. Je größer die Oktanzahl ist, um so höher kann der Kraftstoff im Motor verdichtet werden.
Die Klopffestigkeit wird durch gezielten Umbau der im Rohbenzin enthaltenen Kohlenwasserstoffmoleküle (vgl. 2.5.4.) und durch Zugabe von Antiklopfmitteln, wie z. B. Bleitetraäthyl und -tetramethyl, erhöht.
Zur Verbesserung der Lagerbeständigkeit werden dem Benzin mehrwertige Phenole oder Amine zugesetzt.
Petroleum, der sich an das Benzin anschließende Destillationsschnitt zwischen 180 und 240°C, auch *Kerosin* genannt, hat als Grundlage für den Düsenkraftstoff besondere Bedeutung. Er dient zur Herstellung von Flugturbinenkraftstoff, bei dem eine hohe thermische Stabilität, insbesondere für Überschallflugzeuge, gefordert wird.
Dieselkraftstoff, auch als *leichtes Gasöl* bezeichnet, hat einen Siedebereich zwischen 240 und 350°C. Eins der wichtigsten Merkmale ist seine Zündwilligkeit, die durch die Cetanzahl charakterisiert wird. Dieselöl mit der Cetanzahl 40 genügt den meisten Ansprüchen mittelschnell und schnell laufender Dieselmotoren. Für langsam laufende und daher nicht so empfindliche Schiffsdieselmotoren kann das billigere schwere Gasöl, gegebenenfalls auch unraffiniert, verwendet werden.
Heizöl. Nach seiner Zähigkeit unterscheidet man leichtes, mittelschweres und schweres Heizöl In der DDR gibt es die *H*eizöle auf *E*rdölbasis der Sorten A bis D: HE-A, HE-B, HE-C, HE-D. Die Qualitätskennziffern von HE-A stimmen weitgehend mit denen von Dieselkraftstoff überein, so daß Rohdieselkraftstoff ohne Raffination als HE-A abgegeben wird. Der atmosphärische Rückstand der Erdöldestillation kann direkt als schweres Heizöl HE-D verwendet werden. Die Sorten HE-B und HE-C werden bei der Vakuumdestillation des atmosphärischen Rückstands gewonnen.

2.5.4. Umformen der Destillationsprodukte

Stellt man die Mengen der Produkte der Erdöldestillation dem Verbrauch gegenüber, dann zeigt sich, daß mehr Benzin und Dieselkraftstoff benötigt werden als im Erdöl enthalten sind. Schmieröle und Bitumen fallen etwa im erforderlichen Maße an. Aber von den zwischen dem Dieselkraftstoffschnitt und den Schmierölen überdestillierenden schweren Gasölen entstehen wesentlich größere Mengen als benötigt werden. Es wurden daher Verfahren entwickelt, nach denen nicht direkt verwertbare Anteile des Erdöls und solche, von denen nicht die an-

fallende Menge benötigt wird, in Produkte umgewandelt werden, für die ein hoher Bedarf vorhanden ist.

Kracken (von engl. to crack = zerbrechen) oder **Spalten** nennt man eine Gruppe von Verfahren, nach denen mittelschwere bis schwere Destillate, d. h. höhermolekulare Kohlenwasserstoffe, in wertvolle niedermolekulare Verbindungen, vor allem Benzine, aufgespalten werden. Beim älteren *thermischen Kracken* wird der gewünschte Effekt durch Überhitzen des Einsatzstoffs auf 400 bis 550°C bei einem Druck zwischen 1 und 7 MPa erreicht. Das *katalytische Kracken*, das bei niedrigerer Temperatur in Gegenwart eines Katalysators abläuft, erbringt eine höhere Benzinqualität und eine größere Durchsatzleistung.

Hydrieren kommt außer für mittelschwere und schwere Zwischenprodukte der Erdölverarbeitung auch für Erdöl selbst in Betracht. Dabei werden die langkettigen und ringförmigen Moleküle aufgespalten und die dadurch entstehenden oder schon im Einsatzprodukt vorhandenen ungesättigten Verbindungen durch Wasserstoffanlagerung abgesättigt. Die Ausbeute an Kraftstoffen ist durch die Wahl der Reaktionsbedingungen zu beeinflussen. Je schwerer das Einsatzprodukt ist und je größer die Benzinausbeute sein soll, desto höher müssen Druck (zwischen 3,5 und 20 MPa) und Temperatur (zwischen 370 und 450°C) bei Anwesenheit eines Wolframsulfid- oder Molybdänsulfid-Katalysators gewählt werden.

Reformieren ist eine besondere Form des Krakkens, bei der Benzine niederer Oktanzahl ohne wesentliche Aufspaltung in solche mit hoher Klopffestigkeit übergeführt werden.

Das *thermische Reformieren* ist eine Weiterentwicklung des thermischen Krackens. Die Umwandlung geschieht durch kurzzeitiges Überhitzen auf 510 bis 580°C bei einem Druck zwischen 1,7 und 7 MPa. Die wirtschaftliche Grenze der Oktanzahl des Reformats liegt bei ≈ 70 bis 72.

Beim *katalytischen Reformieren* hat sich besonders die Verwendung von Platinkatalysatoren bewährt. In mehreren nacheinander ablaufenden Reaktionen werden schwersiedende Benzininhaltstoffe mit niedriger Oktanzahl, wie Normalparaffine und Naphthene, in klopffeste hochwertige Benzinbestandteile, wie Aromaten und Isoparaffine, umgewandelt. Die Oktanzahl kann so auf 78 bis 81 erhöht werden.

2.5.5. Polymerisationssynthesen

Unter dieser Bezeichnung kann man diejenigen Verfahren zusammenfassen, bei denen gasförmige Kohlenwasserstoffe, die bei der Erdöldestillation und beim Umformen der Destillationsprodukte, insbesondere beim Kracken, anfallen, zu flüssigen Kraftstoffen hoher Qualität, insbesondere zu Flugbenzin für Kolbenmoto-

ren und hochklopffesten Fahrbenzinen, zusammengefügt werden.

Neben dem *Polymerisieren* und dem *Isomerieren* hat das *Alkylieren* besondere Bedeutung, das Moleküle zweier verschiedener Kohlenwasserstoffe miteinander verbindet, so daß ein neuer Stoff mit völlig anderem Charakter entsteht. Gasförmige Isoparaffine, z. B. Isobutan, werden mit gasförmigen Olefinen, z. B. Propylen, Butylen, Amylen, zu flüssigen Kohlenwasserstoffen vereinigt. Als Katalysator dienen dabei Schwefelsäureanhydrid, Fluorwasserstoffsäure oder durch Salzsäure aktiviertes Aluminiumchlorid.

2.6. Kraft- und Energiemaschinen

In *Energie-* oder *Kraftmaschinen*, nach dem Arbeitsprinzip unterteilt in *Kolben-* und *Strömungsmaschinen*, wird aus dem Energieinhalt des Arbeitsmittels, z. B. Wasser, Dampf, Gas, mechanische Arbeit oder – durch Kopplung mit einem Stromerzeuger (Generator) – Elektroenergie gewonnen. Die natürlichen Energiequellen werden direkt, z. B. Wasserkraft, Windkraft, oder indirekt über Zwischenstufen der Energieumwandlung in Dampferzeugern, Kernreaktoren und Wärmeübertragern genutzt.

2.6.1. Dampferzeuger

Der *Dampferzeuger* im Dampfkraft- oder Heizwerk (vgl. 2.1.1.) wandelt die im Brennstoff gebundene chemische Energie in Wärmeenergie in Form von Dampf bestimmten Drucks und bestimmter Temperatur um.

Wasserdampf dient dem Transport der ihm im Dampferzeuger übertragenen Wärmeenergie. Das dem Dampferzeuger zugeführte *Kesselspeisewasser* bildet nach Aufnahme der Flüssigkeits- und Verdampfungswärme *Sattdampf*, der bei geringster Temperatur- oder Volumenverminderung wieder kondensiert. Durch weitere Wärmezufuhr (Wärmeübertragung im *Überhitzer*, Tafel 9) entsteht *Heißdampf* oder *überhitzter Dampf*. Die technische Ausnutzbarkeit der dem Dampf zugeführten Wärmemenge ist um so größer, je höher Anfangstemperatur und -druck des Dampfs sind. Ihre Steigerungsmöglichkeit ist von den verfügbaren Werkstoffen abhängig. Der *Wärmeinhalt* oder die *Enthalpie* des Wasserdampfs kann aus einem Zustandsdiagramm (*Mollier-h,s-Diagramm*) bzw. der Wasserdampftafel als Funktion abgelesen werden.

Wirkungsweise von Dampferzeugern. Sie ist hier am Beispiel eines Dampferzeugers mit Trommel erläutert (Abb. 2.6.1-1); die modernen Groß-

dampferzeuger sind aber trommellose Konstruktionen. Im *Feuerraum* wird der Brennstoff durch geregelte Luftzufuhr so verbrannt, daß eine vollkommene *Verbrennung* erreicht wird, die eine optimale Brennstoffausnutzung ergibt. Der Feuerraum ist mit einer Vielzahl von wasserdurchflossenen Rohren ausgekleidet, die sämtlich mit der *Trommel* verbunden sind. Dieses Rohrsystem bezeichnet man als *Verdampfer*, da in ihm die eigentliche Dampfbildung stattfindet. Die Wärmeübertragung geschieht vornehmlich durch Strahlung, weniger durch Berührung (Konvektion). Der Verdampfer erhält ständig durch einen stetigen *Wasserumlauf* die notwendige Wasserzufuhr zur Bildung von *Sattdampf*, der sich in der Trommel aus dem gebildeten Dampf-Wasser-Gemisch abscheidet. Der Sattdampf strömt aus der Trommel in den *Überhitzer*, wo er von den um die Rohre strömenden Rauchgasen auf die gewünschte Endtemperatur erhitzt wird und den Dampferzeuger verläßt.

Die Rauchgase enthalten hinter dem Überhitzer noch so viel Wärme, daß zur Verbesserung des Wirkungsgrads noch weitere Heizflächen angeordnet werden. Der *Speisewasservorwärmer* oder *Economiser* hat die Aufgabe, das aufbereitete Speisewasser auf die Siedetemperatur entsprechend des Kesseldrucks vorzuwärmen; erfolgt dabei eine geringe Dampfbildung, so spricht man von *Vorverdampfung*. Das vorgewärmte Speisewasser wird mittels der Speisewasserpumpe in die Trommel gefördert. Als letzte Heizfläche auf dem Rauchgasweg ist der *Luftvorwärmer* angeordnet, der die restliche Nutzwärme des Rauchgases an einen Teil der Verbrennungsluft überträgt, die damit eine bessere Zündung und eine höhere Temperatur im Feuerraum ermöglicht.

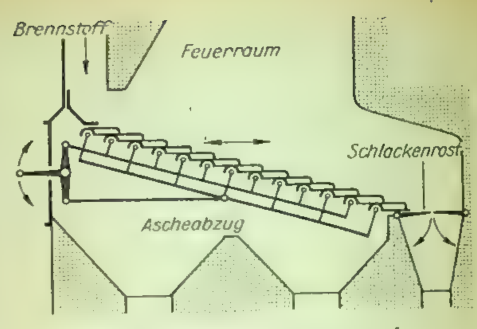


Abb. 2.6.1-2 Mechanischer Vorschubrost

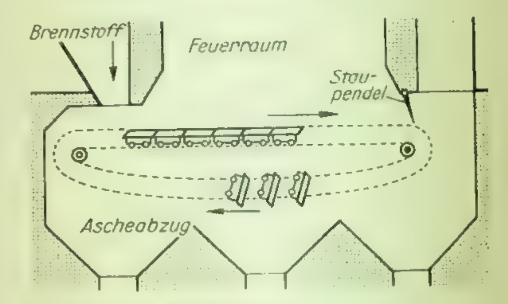


Abb. 2.6.1-3 Wanderrost

Feuerungsarten. Für feste Brennstoffe verwendet man je nach Art und Stückigkeit der Kohle Rost- und Staubfeuerungen. *Rostfeuerungen* unterteilt man in starre (*Plan-, Treppen-, Muldenrost*) und mechanisch bewegte Feuerungen (*mechanischer Mulden-, Schwingschub-* bzw. *Vorschub-, Wanderrost*) (Abb. 2.6.1-2 und 2.6.1-3).

Kohlenstaubfeuerungen mit trockenem Ascheabzug, nach der Brenneranordnung im Feuer-

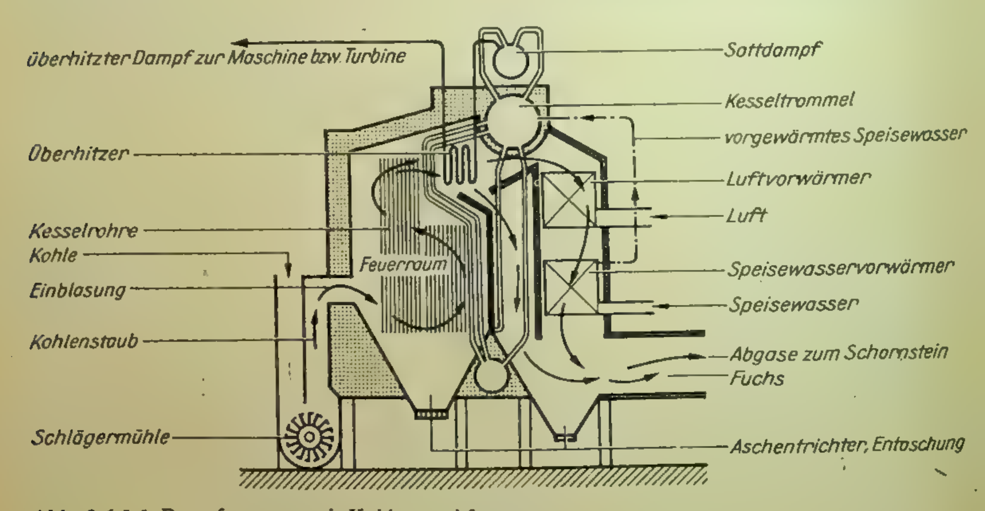


Abb. 2.6.1-1 Dampferzeuger mit Kohlenstaubfeuerung

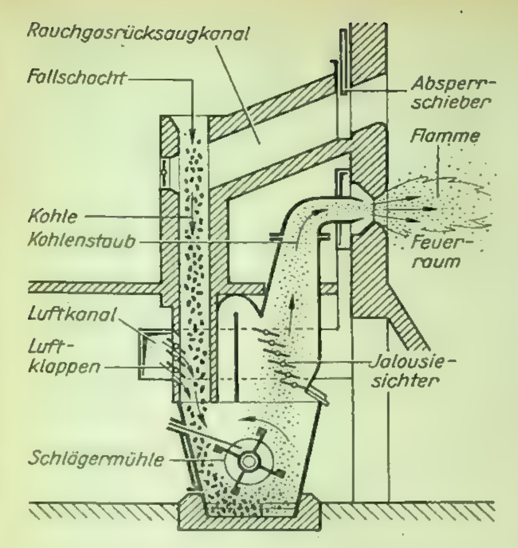


Abb. 2.6.1-4 *Schlägermühlenfeuerung*

raum unterteilt in *Front-, Ecken-* und *Deckenfeuerungen*, können mit Braun- und Steinkohle und solche *mit flüssigem Ascheabzug* (*Schmelzfeuerung, Zyklon, Wirbelschmelzkammer*) vornehmlich mit Steinkohle beschickt werden. Sämtliche Kohlenstaubfeuerungen sind mit einem *Mahlsystem* gekoppelt, in dem die Kohle zu Staub bestimmter Körnung zerkleinert wird. Die Mahlung kann in *Einzel-* und *Zentralmahlanlagen* stattfinden. Für Braunkohle findet ausnahmslos die Einzelmahlanlage Anwendung, wobei die einzelne Mühle die Funktion des in den Feuerraum einblasenden Ventilators mit übernimmt. Man spricht deshalb auch von *Mühlenfeuerung* mit *Ventilator-* oder *Schlägermühle* (Abb. 2.6.1-4). Seltener sind *Zentralmahlanlagen*, von denen der Kohlenstaub mehreren Dampferzeugern durch Rohrleitungen mittels Druckluft zugeführt wird.

Für flüssige Brennstoffe werden *Zerstäuberbrenner* (*Druckzerstäuber-, Rotationsbrenner*) nach Art des Öles und nach der Größe der Feuerungsleistung im Dampferzeuger eingesetzt. Für gasförmige Brennstoffe werden die Brenner nach ihrem Mischsystem für Gas und Luft unterschieden (*Wirbelbrenner*).

Dampferzeugerbauarten. Nach Art des Wasserraums unterscheidet man Behälter- und Wasserrohr-Dampferzeuger.

Behälter- oder Großwasserraum-Dampferzeuger. Hauptvertreter sind der *Flammrohr-Dampferzeuger* (Abb. 2.6.1-5) und der *Flammrohr-Rauchrohr-Dampferzeuger*. Letzterer fand vor allem in der Dampflokomotive verbreitet Anwendung.

Wasserrohr-Dampferzeuger haben gegenüber den veralteten Behälter-Dampferzeugern gleicher Dampfleistung einen wesentlich geringeren Platzbedarf und sind schnell betriebsbereit. *Wasserrohr-Dampferzeuger mit natürlichem Wasserumlauf* sind *Kammer-, Steilrohr-* und *Strahlungs-Dampferzeuger*. Sie unterscheiden sich vor allem in der Gestaltung der Verdampferheizflächen. Der Strahlungs-Dampferzeuger eignet sich besonders für große Leistungen und ist in allen modernen Großkraftwerken im Einsatz. In einem *Zwangumlauf-Dampferzeuger* (System *La Mont*) wird das Dampf-Wasser-Gemisch mittels einer Umwälzpumpe durch das Verdampfersystem gepumpt, was beliebige Rohranordnung und -größe und damit sehr gedrängte Bauweise ermöglicht. *Zwangdurchlauf-Dampferzeuger* (Systeme *Benson, Sulzer, Ramsin*) haben keine Trommel; das Speisewasser wird mittels Speisepumpe durch ein System parallel geschalteter Rohre gedrückt, die sämtlich nacheinander die Funktionen des Vorwärmers, Verdampfers und Überhitzers ausüben. Diese Dampferzeuger sind schnell betriebsbereit und können Belastungsschwankungen sehr gut angepaßt werden.

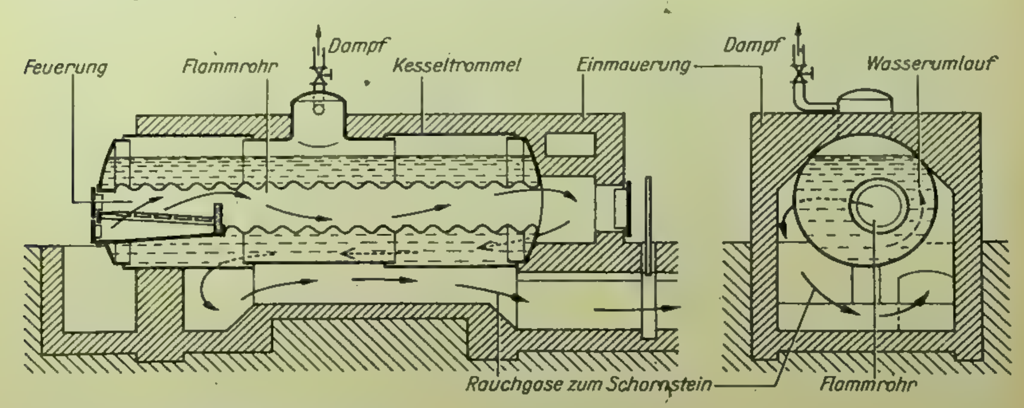


Abb. 2.6.1-5 *Flammrohr-Dampferzeuger*

2.6.2. Kolbenkraftmaschinen

In einer *Kolbenkraftmaschine* wird ein Teil der Energie des Arbeitsmittels (Verbrennungsgase, Dampf) durch die Druckwirkung auf in Zylindern bewegliche Kolben unmittelbar in mechanische Arbeit umgewandelt. Nach Art der Kolbenbewegung unterscheidet man zwischen *Hubkolben-* und *Kreiskolben-* bzw. *Rotationskolbenmaschinen*. Die Kolbenarbeit kann zum Antrieb von Fahrzeugen, Stromerzeugern, Arbeitsmaschinen (Pumpen, Verdichter) u. a. genutzt werden. Bei den Hubkolbenmaschinen wird dabei die geradlinige Bewegung des Kolbens durch Pleuel und Kurbelwelle in eine Drehbewegung umgeformt. Nach dem Arbeitsmittel unterteilt man die Kolbenkraftmaschinen in Verbrennungskraftmaschinen (Verbrennungsmotoren) und Dampfkraftmaschinen (Kolbendampfmaschinen).

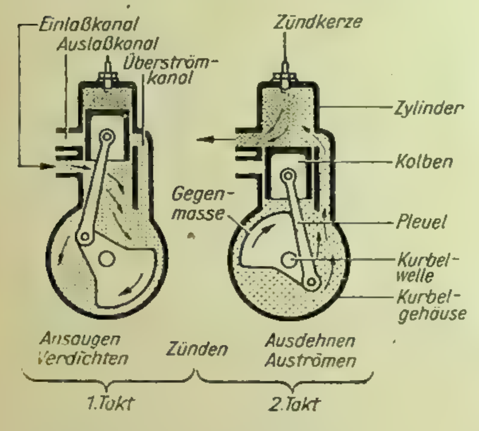


Abb. 2.6.2-1 Arbeitsweise eines Zweitakt-Ottomotors mit Dreistromspülung

Kolbendampfmaschinen. Ihre Arbeitsweise beruht auf Entspannung von Heiß- oder Sattdampf im Zylinder. Sie haben als erste funktionsfähige Kraftmaschinen (Patente von *James Watt* 1769) entscheidend zur industriellen Entwicklung beigetragen, besitzen heute jedoch keine größere praktische Bedeutung mehr.

Verbrennungsmotoren nutzen die bei der Verbrennung von Kraftstoff im Zylinder entstehende Ausdehnung des Kraftstoff-Luft-Gemischs zur Erzeugung mechanischer Arbeit. Bedeutung haben heute vor allem die nach ihren Erfindern benannten *Otto-* und *Dieselmotoren*.

Ottomotoren saugen ein Kraftstoff-Luft-Gemisch an, das verdichtet und dessen Verbrennung durch eine von der Kolbenstellung gesteuerte Fremdzündung (*Zündkerzen*) eingeleitet wird. Nach der *Gemischbildung* unterscheidet man Vergaser-, Einspritz- und Gasmotor. Bei dem bevorzugten *Vergasermotor* wird flüssiger Kraftstoff (meist Benzin) vor Eintritt in den Zylinder in einem Vergaser zerstäubt und mit Luft gemischt, beim *Einspritzmotor* (z. B. Renn- und Flugmotoren) jedoch flüssig in den Brennraum eingespritzt, so daß sich die Gemischbildung erst innerhalb des Zylinders vollzieht. Der *Gasmotor* arbeitet mit gasförmigem Kraftstoff (Stadt-, Gicht-, Generator-, Erdgas u. a.), der sich mit der Verbrennungsluft im Mischventil oder unmittelbar im Einlaßventil mischt. Nach der Anzahl der Takte während eines Arbeitsspiels unterscheidet man Zweitakt- und Viertaktmotoren, wobei als *Takt* der Zeitraum bezeichnet wird, in dem der Kolben den Weg von einem zum anderen Totpunkt bzw. die Kurbelwelle eine halbe Umdrehung zurücklegt.

Zweitakt-Ottomotor. Bei der *Dreikanalbauart* (*Dreistromspülung*, Abb. 2.6.2-1) werden der Eintritt des Gemischs und der Austritt des Abgases durch Schlitze im Zylinder (*Ein-* und *Auslaßkanal*) geregelt, die der Kolben zum entsprechenden Zeitpunkt durch seine Bewegung im Zylinder freigibt bzw. verschließt. Bei jeder

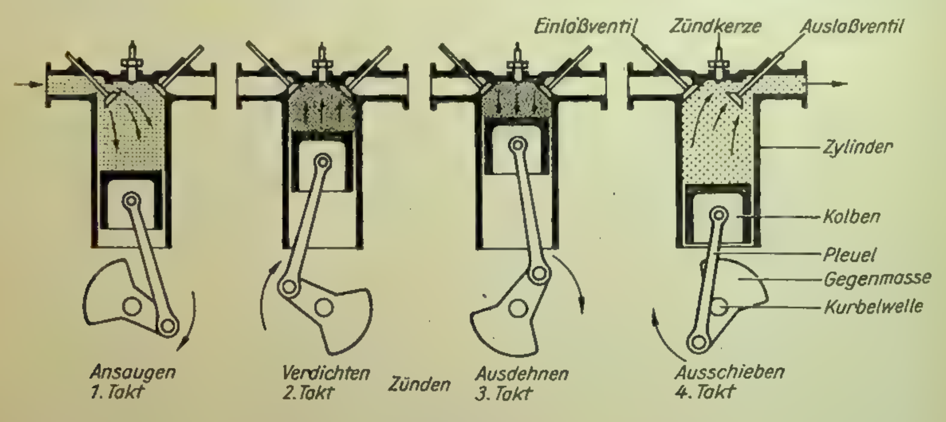


Abb. 2.6.2-2 Arbeitsweise eines Viertakt-Ottomotors

Kolbenbewegung vollziehen sich 2 Vorgänge (ober- und unterhalb des Kolbens) gleichzeitig. Beim 1. Takt bewegt sich der Kolben aufwärts, verschließt Auslaß- und *Überströmkanal* und öffnet den Einlaßkanal. Über dem Kolben wird das dort vom vorigen Hub her befindliche Gemisch verdichtet, unter dem Kolben durch den entstehenden Unterdruck neues Gemisch vom Vergaser angesaugt. Zu Beginn des 2. Takts wird das Gemisch über dem Kolben gezündet und dieser nach unten getrieben, so daß er Arbeit abgibt. Unter dem Kolben wird – nachdem er den Einlaßkanal verschlossen hat – das neue Gemisch im *Kurbelgehäuse* verdichtet. Gegen Ende des 2. Takts gibt der Kolben Überström- und Auslaßkanal frei, aus dem Kurbelgehäuse strömt durch ersteren frisches Gemisch in den Zylinderteil oberhalb des Kolbens und spült die Abgase durch den Auslaßkanal heraus. Bei der *Zweikanalbauart* (*Umkehrspülung*) wird das Ansaugen des Kraftstoff-Luft-Gemischs durch einen *Drehschieber* gesteuert.

Viertakt-Ottomotor (Abb. 2.6.2-2). Während des 1. Takts geht der Kolben abwärts, und zugleich wird durch das Einlaßventil das Kraftstoff-Luft-Gemisch angesaugt. Während des 2. Takts sind beide Ventile geschlossen; der aufwärts gehende Kolben verdichtet das Gemisch. Etwa bei Beginn des 3. Takts wird das Gemisch entzündet; die schlagartig einsetzende Verbrennung bewirkt eine Drucksteigerung bei nahezu konstantem Volumen (*Gleichraumverbrennung*), die entstehenden Verbrennungsgase treiben den Kolben nach unten und leisten Arbeit. Zu Beginn des 4. Takts öffnet das Auslaßventil, und das Abgas strömt aus dem Zylinder heraus. Am Ende des 4. Takts schließt das Auslaßventil, und das Arbeitsspiel beginnt von vorn.

Dieselmotoren saugen reine Luft an, die wesentlich höher verdichtet wird als das Gemisch im Ottomotor. Dadurch steigt die Lufttemperatur auf 700 bis 800 °C an, und der dann eingespritzte Kraftstoff (Dieselöl, Schweröl o. a.) entzündet sich von selbst. Dieselmotoren arbeiten ebenfalls nach dem Viertakt- oder Zweitaktverfahren, und nach Verbrennung des Kraftstoffs laufen die Vorgänge im Zylinder wie beim Ottomotor ab. Bei modernen Dieselmotoren wird der Kraftstoff von einer Hochdruckkolbenpumpe eingespritzt. Es wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die eine gute Gemischbildung beim Einspritzen des flüssigen Kraftstoffs gewährleisten sollen (Abb. 2.6.2-3). Bei der *direkten Einspritzung* in den Zylinder beträgt der Einspritzdruck 18 bis 40 MPa. Beim *Vorkammerverfahren* wird der Kraftstoff mit 8 bis 12 MPa Druck in eine Vorkammer gespritzt, in der er teilweise verbrennt; der dabei entstehende Druck bläst den Vorkammerinhalt gut zerstäubt in den Zylinder. Das *Wirbelkammerverfahren* ergibt eine intensive Gemischbildung durch Einblasen des Kraftstoffs mit einem Druck von 8 bis 13 MPa in den sich bei der Verdichtung in der Wirbelkammer ausbildenden Luftwirbel. Beim *Luftspeicherverfahren* wird der Kraftstoff in Richtung der Speicheröffnung gespritzt. Die entstehende Teilverbrennung erhöht den Druck im Speicher und führt zum Ausblasen in den Hauptbrennraum. Da hierbei der Ausblasestrahl und der weiter eindringende Kraftstoffstrahl gegeneinander gerichtet sind, ergibt sich eine gute Zerstäubung und Vermischung des Kraftstoffs im Hauptbrennraum.

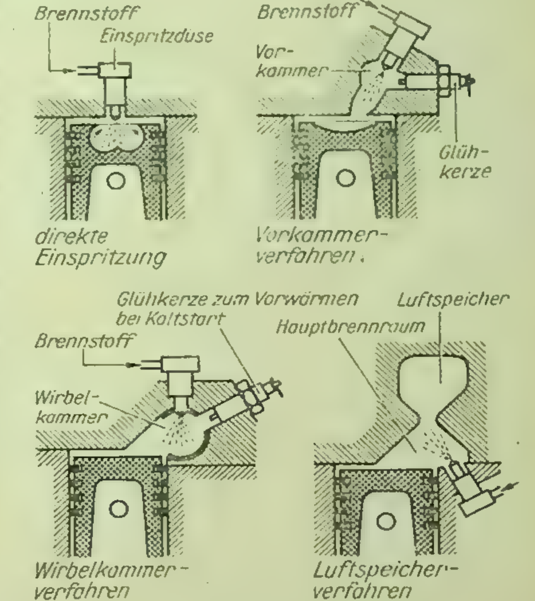


Abb. 2.6.2-3 Einspritzverfahren bei Dieselmotoren

Im Unterschied zum Ottomotor verbrennt der in den Dieselmotor eingespritzte Kraftstoff relativ langsam. Der Kolben bewegt sich dabei weiter, so daß der Druck während der Verbrennung im Zylinder etwa gleich bleibt (*Gleichdruckverbrennung*). Durch *Aufladung*, d. h. Vorverdichten der Frischluft, kann man eine Leistungssteigerung von 40 bis 70 %, durch *Hochaufladung* (mit mehrstufiger Verdichtung und Zwischenkühlung der Ladeluft) von 100 % und mehr erreichen. Das Aufladen geschieht mit Hilfe eines Laders (Verdichter), der mit dem Motor selbst oder mit einer von dessen Abgasen angetriebenen Gasturbine (*Abgasturbolader*) gekuppelt ist.

Aufbau – Bauarten. Hubkolbenmotoren baut man mit stehenden, liegenden oder schräg angeordneten Zylindern. Motoren größerer Leistung haben mehrere Zylinder (Ottomotoren

i. allg. bis zu 8, Dieselmotoren bis zu 12), wobei die Kolben ihre Arbeit bzw. Leistung über eine Kurbelwelle abgeben. Vorherrschend sind der *Einreihenmotor* in stehender, schrägstehender und liegender Ausführung sowie *Mehrreihenmotoren* mit 2 V-förmig (V-Motor, Tafel 11) angeordneten oder 2 gegenüberliegenden (*Boxermotor*) Zylinderreihen. Flugmotoren (heute nur noch für Sportflugzeuge) werden meist als *Sternmotoren* mit sternförmig um eine Kurbelwelle angebrachten Zylindern gebaut, und in Krafträdern ist der *Einzylinder-Ottomotor* üblich. Beim Dieselmotor müssen wegen der höheren Verdichtung und des höheren Verbrennungsenddrucks Zylinder, Kolben, Pleuel, Kurbelwelle und Lager kräftiger als beim Ottomotor ausgeführt werden.

Rotationskolbenmotoren (*Kreiskolbenmotoren*) haben einen rotierenden Kolben in Form eines Trochoids (Seitenfläche = gleichseitiges Bogendreieck), der in einem Epitrochoidengehäuse umläuft, wobei der Umlauf von einer entgegengesetzten Drehung eines Exzenterzapfens der Triebwelle überlagert wird. Beim Umlauf des Kolbens entstehen zwischen dessen 3 Kanten und der Gehäusewand Räume mit veränderlichem Volumen, in denen wie beim Viertakt-Ottomotor in Hubkolbenbauart das Ansaugen und Verdichten, die Verbrennung und das Ausschieben vor sich gehen.

Kühlung. Die bei der Verbrennung auftretenden hohen Temperaturen von ≈ 2800 °C beim Ottomotor und 1500 bis 2000 °C beim Dieselmotor bedingen eine Zylinderkühlung. Üblich sind sowohl die *Luftkühlung*, bei der die Zylinder außen Kühlrippen tragen und vom Fahrtwind (bei Motorradmotoren) oder von einem Gebläse gekühlt werden (*Gebläsekühlung*), als auch die *Wasserkühlung*, bei der die Zylinder doppelwandig sind und von Kühlwasser umspült werden (vgl. 16.2.2.).

Einsatz von Verbrennungsmotoren. Ottomotoren werden vor allem in Krafträdern, PKW und leichten LKW sowie als Antrieb für ortsveränderliche Pumpen und Verdichter, für Boote u. a. verwendet. Dieselmotoren erreichen hohe Gesamtwirkungsgrade bis zu 45 %. Sie dienen zum Antrieb von schweren LKW, Schiffen und Triebfahrzeugen der Eisenbahn sowie von Notstromaggregaten, Schiffshilfsmaschinen u. a. In der Flugtechnik finden Verbrennungsmotoren heute nur noch als Antrieb kleinerer Sportflugzeuge Anwendung. Der Rotationskolbenmotor wurde zwar vereinzelt als PKW-Antrieb eingesetzt (nach seinem Erfinder auch als *Wankel-Motor* bezeichnet), konnte aber gegenüber den Hubkolbenmotoren vor allem wegen der Abdichtungsprobleme und der erforderlichen hohen Bearbeitungsgenauigkeiten bisher keinen entscheidenden Durchbruch erzielen.

In *Strömungskraftmaschinen* wird die Energie eines strömenden Arbeitsmittels (Wasser, Dampf oder Gas) mit Hilfe eines rotierenden *Laufgitters* geändert. Die Strömungsteilchen treffen mit hoher Geschwindigkeit auf das in einem *Läufer (Rotor)* befestigte Laufgitter, und durch ihre Umlenkung an den *Laufschaufeln* wird die kinetische Energie der Teilchen zum großen Teil über das Laufgitter an den Rotor übertragen, der sie über eine *Kupplung* als mechanische Arbeit abgibt. Nach der Hauptströmungsrichtung des Arbeitsmittels unterscheidet man *Axial-*, *Radial-* und *Diagonalmaschinen*. Im Unterschied zu Kolbenkraftmaschinen werden die Arbeitsräume (Schaufelkanäle) der Strömungskraftmaschinen kontinuierlich vom Arbeitsmittel durchströmt.

Wasserturbinen. *Arbeitsweise.* Das durchströmende Medium erfährt praktisch keine Änderung der Dichte und der Temperatur. Die durch die Höhendifferenz zwischen oberem und unterem Wasserspiegel bedingte potentielle Energie des Wassers (Fallhöhe) wird in den aus verstellbaren *Leitschaufeln* bestehenden *Leitgittern* mit sich verengenden Strömungskanälen oder in *Düsen* in kinetische Energie umgesetzt, d. h., es wird eine große Strömungsgeschwindigkeit erzeugt, mit der das Wasser auf die Laufschaufeln der Turbine trifft. Bei *Gleichdruck-* oder *Aktionsturbinen* wird vor dem Laufrad die gesamte potentielle in kinetische Energie umgesetzt; im Laufrad ändert sich der statische Druck nicht mehr, der *Reaktionsgrad* (Verhältnis des im Laufgitter umgesetzten zum Gesamtgefälle) hat den Wert 0. Bei *Überdruck-* oder *Reaktionsturbinen* wird dagegen vor dem Laufrad nur ein Teil der potentiellen Energie in kinetische umgewandelt; vor dem Laufrad herrscht Überdruck, die restliche Druckumsetzung geschieht im Laufrad.

Aufbau — Bauarten. Wasserturbinen können je nach Bauart Gefälle zwischen 1 und 2000 m umsetzen und werden stets einstufig ausgeführt. Der Laufraddurchmesser beträgt i. allg. 0,3 bis 12 m; die Turbinenwelle kann waage- oder senkrecht liegen. Die Leistung einer Wasserturbine ist von der Wassermenge und Fallhöhe abhängig (Tab. 2.6.3-1) und ist aufgrund der Verstellbarkeit der Leit- und Laufschaufeln gut regelbar. Da die Einsatzbedingungen sehr unterschiedlich sind, wurden verschiedene Bauarten entwickelt. Die *Kaplan-Turbine* (Abb. 2.6.3-2) ist nur bei

Tab. 2.6.3-1 *Daten von Wasserturbinen*

	Fallhöhe in m	Grenzleistung in MW
Peltonturbine	300 bis > 1700	200
Francisturbine	25 bis 600	500
Kaplanturbine	3 bis 80	200

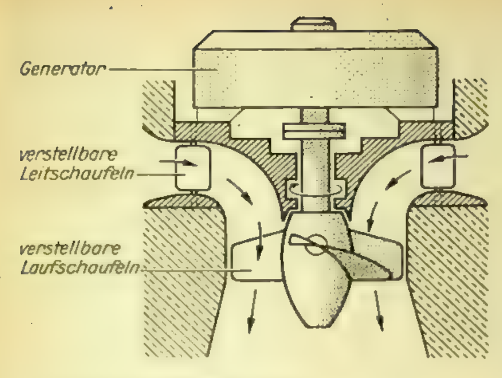


Abb. 2.6.3-2 Kaplan-Turbine

kleinem Gefälle geeignet. Die verstellbaren Leit- und Laufschaufeln (Tafel 7) sichern auch bei Belastungs- und Gefälleschwankungen einen etwa gleichbleibenden Wirkungsgrad. Die Kaplan-Turbine ist eine *vollbeaufschlagte* Überdruckturbine, ebenso die bei mittlerem Gefälle eingesetzte *Francis-Turbine* (Abb. 2.6.3-3), die aber im Unterschied zur Kaplan-Turbine radial durchströmt wird. Moderne Konstruktionen von Francis-Turbinen haben ebenfalls verstellbare Leit- und Laufschaufeln. Die *Pelton-* oder *Freistrahl-Turbine* (Abb. 2.6.3-4) ist eine Gleichdruckturbine für großes Gefälle. Sie arbeitet mit *Teilbeaufschlagung*, d. h., das Wasser strömt aus einer oder mehreren Düsen mit hoher Geschwindigkeit tangential jeweils nur auf eine Laufschaufel.

Dampfturbinen. *Arbeitsweise.* Ein Maß für die in einer Dampfturbinenstufe in Bewegungsenergie umsetzbare potentielle Energie ist das *Enthalpiegefälle* der Stufe (*Enthalpiedifferenz, Stufengefälle*), das um so größer ist, je höher Dampfdruck- und -temperatur vor und je kleiner sie hinter der Stufe sind. Dampfturbinenstufen werden stets für eine Energieumsetzung mit Reaktion ausgelegt. Man unterscheidet *Stufen mit geringer Reaktion*, bei denen das Stufengefälle zum größten Teil im Leitgitter, und *Stufen mit 50% Reaktion*, bei denen es zu gleichen Teilen im Leit- und Laufgitter umgesetzt wird. Um einen guten *Stufenwirkungsgrad* zu erreichen, müssen die Umfangsgeschwindigkeit der rotierenden Laufschaufeln und die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfs in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Je höher die Umfangsgeschwindigkeit, desto größer die mögliche Dampfgeschwindigkeit und damit das in einer Stufe umsetzbare Enthalpiegefälle.

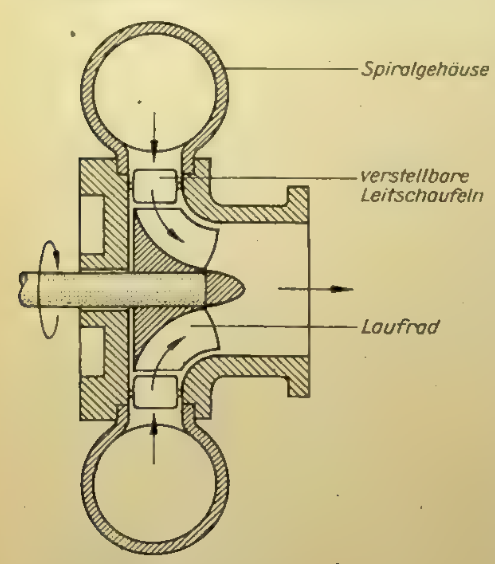


Abb. 2.6.3-3 Francis-Turbine

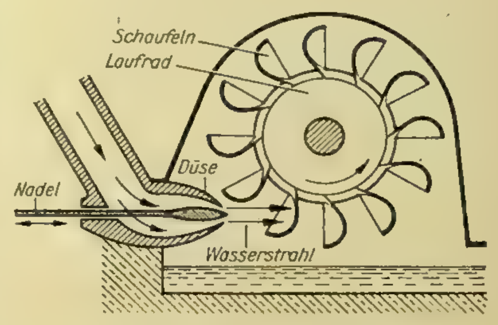


Abb. 2.6.3-4 Pelton- oder Freistrahlturbine

Meist müssen viele Stufen hintereinander auf dem Läufer angeordnet werden, um das zur Verfügung stehende Gesamtgefälle verarbeiten zu können. Im Unterschied zu den Wasserturbinen wächst das spezifische Dampfvolumen durch die Druckabnahme bei der Expansion in der Dampfturbine stark an. Bei entsprechendem Ein- und Austrittszustand des Dampfs kann es am Turbinenaustritt etwa den 1300fachen Wert des spezifischen Volumens am Eintritt annehmen. Infolgedessen muß der Strömungsquerschnitt der Turbine mit fortschreitender Expansion anwachsen; dies erreicht man dadurch, daß der mittlere Stufendurchmesser, die Schaufellänge und der Strömungswinkel von der Eintritts- zur Austrittsseite zunehmen.

Aufbau – Bauarten. Das *Turbinengehäuse* begrenzt den Dampfraum nach außen und trägt die Einbauten (Leitgitter, Wellendichtungen). Die *Wellendichtungen* sind als berührungsfreie *Labyrinthdichtungen* ausgebildet. Der Turbinenläufer ist je nach Auslegung der Turbine als steifer *Trommelläufer* (geringe Durchbiegung, $n_{krit} > n_{Betrieb}$) oder weicher *Scheibenläufer* (größere Durchbiegung, $n_{krit} < n_{Betrieb}$) ausgeführt. Bei großer geforderter Leistung ist eine

Aufteilung auf mehrere Teilturbinen (Hochdruck- [HD-] Teil, Mitteldruck- [MD-] Teil und ein oder mehrere Niederdruck- [ND-] Teile) notwendig (Abb. 2.6.3-5), da bei den üblichen hohen Frischdampfparametern sehr viele Stufen zur Energieumsetzung benötigt werden, die Zahl der auf einem Läufer unterzubringenden Stufen jedoch beschränkt ist (je nach deren Bauart 15 bis 40). Der Abstand der Läuferlager muß in gewissen Grenzen gehalten werden, da sich sonst eine ungünstige kritische Drehzahl und schlechte Laufeigenschaften ergeben. Sämtliche Läufer der Teilturbinen sind durch starre Kupplungen miteinander verbunden. Am Eintritt des HD-Teils moderner *Heißdampfturbinen* treten hoher Dampfdruck (bis zu 24 MPa) und hohe Dampftemperatur (meist 535 oder 565 °C) auf, weshalb hier meist ein *Doppelmantelgehäuse* gewählt wird (Abb. 2.6.3-6). Druckdifferenz und Temperaturgefälle, die von innen nach außen entstehen und vom Gehäuse aufzunehmen sind, werden dadurch abgestuft, so daß die einzelnen *Gehäuseschalen* dünnwandiger und elastischer gehalten werden können. Moderne HD-Gehäuse werden aufgrund ihres dadurch günstigeren Wärmedehnungsverhaltens und der geringeren [Undurch]lässigkeitsverluste (Energieverlust infolge

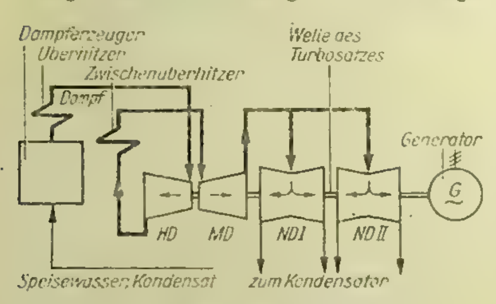


***Abb. 2.6.3-5** Aufbau eines 500-MW-Turbosatzes aus mehreren Teilturbinen*

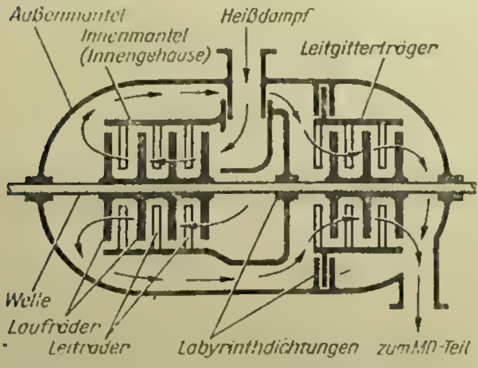


***Abb. 2.6.3-6** HD-Teil einer Dampfturbine mit Doppelmantelgehäuse und Mitteneinströmung*

Dampfdurchlässigkeit der Außenstopfbuchsen) oft mit Mitteneinströmung gebaut (vgl. Abb. 2.6.3-6). Um das Arbeitsvermögen des Dampfs zu erhöhen, wird häufig eine einfache (vgl. Abb. 2.6.3-5) oder zweifache *Zwischenüberhitzung* (Tafel 9) im Dampferzeuger vorgenommen (vgl. 2.6.1.). Im ND-Teil von Dampfturbinen großer Leistung ist die Bewältigung des großen Dampfvolumens das entscheidende Problem. ND-Teil und z. T. auch der MD-Teil müssen deshalb bei großem Dampfdurchsatz mehrflutig (Aufteilung des Dampfstroms in mehrere parallele *Fluten*) ausgeführt werden, da ihre möglichen Abmessungen wegen des Festigkeitsverhaltens der Werkstoffe beschränkt sind. Der ND-Teil des 500-MW-Turbosatzes in Abb. 2.6.3-5 besteht z. B. aus 2 zweiflutigen ND-Gehäusen.

Einsatz – Leistungen. Die Dampfturbine ist die für die Elektroenergieerzeugung entscheidende Kraftmaschine (in der DDR erfolgt z. B. der Antrieb der Generatoren zu > 90 % durch Dampfturbinen, Tafel 11). Die Drehzahl der Kraftwerksturbinen liegt bei der in Europa üblichen *Netzfrequenz* von 50 Hz bei 3 000 U/min, lediglich bei großen Sattdampfturbinen von Kernkraftwerken z. T. auch bei 1 500 U/min. Bei einer Netzfrequenz von 60 Hz (USA) betragen die Turbinendrehzahlen entsprechend 3 600 bzw. 1 800 U/min. Dampfturbinen werden in der Energieversorgung entweder zur reinen Stromerzeugung oder – in *Industrie-* und *Heizkraftwerken* – gleichzeitig zur Stromerzeugung und *Wärmeversorgung* (Abgabe von Industrie- oder Heizdampf an bestimmte Verbraucher) eingesetzt, wobei man verschiedene Turbinenschaltungen unterscheidet. Zur Verbesserung des Prozeßwirkungsgrads sind bei allen Dampfturbinen großer Leistung *Anzapfungen* zum Vorwärmen des Speisewassers mit Anzapfdampf vorhanden. Die mit Druck- oder Siedewasserreaktoren ausgerüsteten Kernkraftwerke weisen *Sattdampfturbinen* auf. In den mit Hochtemperaturreaktoren oder schnellen Brutreaktoren ausgestatteten Kernkraftwerken können wie in konventionellen Dampfkraftwerken auf der Basis fossiler Brennstoffe *Heißdampfturbinen* zum Einsatz kommen. Die am meisten verbreiteten *einwelligen Dampfturbinen* baut man z. Z. für Leistungen bis 1 200 MW. Dampfturbinen größerer Leistung werden projektiert. Außer zur Elektroenergieerzeugung nutzt man Dampfturbinen auch zum Antrieb von Arbeitsmaschinen (z. B. Pumpen und Verdichter) und Schiffen.

Gasturbinen. *Arbeitsweise.* In einer Gasturbine wird ein Teil der Energie eines heißen Gases nach dem bei den Dampfturbinen erläuterten Arbeitsprinzip in mechanische Arbeit umgesetzt. Die Energieumsetzung in einer Gasturbinenstufe (meist mit 50 % Reaktion) und ihr Stufenaufbau ähneln denen einer Dampfturbinenstufe.

Aufbau – Bauarten. Bei *offenen Gasturbinenanlagen* komprimiert der Verdichter aus der Atmosphäre angesaugte Luft und fördert sie in die

Brennkammer. Dort wird flüssiger oder gasförmiger Brennstoff zugeführt und verbrannt. Die heißen Verbrennungsgase geben Energie an den Turbinenläufer ab, der den Verdichter und – bei Anlagen zur Stromerzeugung – den Generator antreibt, und entweichen in die Atmosphäre. Beim Anfahren der Anlage bis zum Zünden der Brennkammer liefert ein *Anwurfmotor* die Verdichterantriebsleistung. Dieser wird abgeschaltet, sobald die Turbine die Antriebsleistung aufbringt. Bei Verbrennungsgastemperaturen von 750°C am Turbineneintritt erreicht eine einfache offene Gasturbinenanlage in *Einwellenanordnung* nach Abb. 2.6.3-7 einen Gesamtwirkungsgrad von ≈ 25%. Einen besseren Wirkungsgrad kann man durch *mehrstufige Verdichtung* mit *Zwischenkühlung* und durch *Vorwärmen* der verdichteten Luft in einem *Rekuperator* (vgl. 2.6.5.) erreichen. Dazu werden die Gasturbinenanlagen in Abhängigkeit von der Leistungsgröße z. T. in *Mehrwellenanordnung* mit 2 bis 3 (HD-, MD-, ND-) Verdichtern und Turbinen in verschiedenen Schaltungen gebaut, wobei die einzelnen Stränge nur durch den Arbeitsmittelstrom gekoppelt sind und unterschiedliche Drehzahlen aufweisen können. Bei offenen Gasturbinenanlagen mit Leistungen bis ≈ 80 MW überwiegt heute die Einwellenanordnung in *Tuko-Bauweise*, d. h., Turbinen- und Kompressorbeschaufelung befinden sich auf einem gemeinsamen Rotor mit nur 2 Lagern.

In einer *geschlossenen Gasturbinenanlage* (Abb. 2.6.3-8) zirkuliert das Arbeitsmittel (Luft, Helium u. a.) ständig, und jegliche Wärmezu- und -abfuhr geschieht indirekt durch entsprechende Wärmeübertrager. Im Unterschied zu offenen Anlagen kann man sie mit höheren Absolutdrücken fahren und so bei gleichen Abmessungen eine höhere Leistung je Einheit erreichen. Außer für Öl und Gas kann der Gaserhitzer auch für feste Brennstoffe ausgelegt und in Zukunft – bei *nuklearen Gasturbinenanlagen* – sogar durch einen *Kernreaktor* ersetzt werden, da keine Verunreinigungen in den geschlossenen Arbeitsmittelkreislauf gelangen können.

Einsatz – Leistungen. Offene Gasturbinenanlagen (Tafel 11) mit Leistungen bis 100 MW werden in Spitzenlast- und fahrbaren Kraftwerken sowie in Verbindung mit Dampferzeuger und Dampfturbine in kombinierten *Gas-Dampf-Anlagen*, ferner als Notstromaggregate, Flugtriebwerke und Haupt- oder Zusatzantrieb auf Schiffen eingesetzt. Geschlossene Gasturbinenanlagen verwendet man vereinzelt in *Heizkraftwerken*, und es wird an Projekten für Kernkraftwerke mit geschlossenen Gasturbinenanlagen für Leistungen bis 1000 MW gearbeitet.

Die wesentlichsten konstruktiven Probleme beim Bau von Gasturbinenanlagen ergeben sich aus der in der Brennkammer bzw. im Gaserhitzer und am Turbineneintritt auftretenden hohen Temperatur (≈ 650 bis 900°C bei stationären Anlagen, ≈ 1200°C bei Strahltriebwerken). Man löst sie

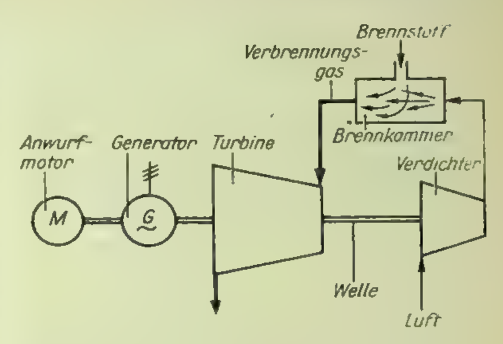


***Abb. 2.6.3-7** Offene Gasturbinenanlage in Einwellenanordnung*

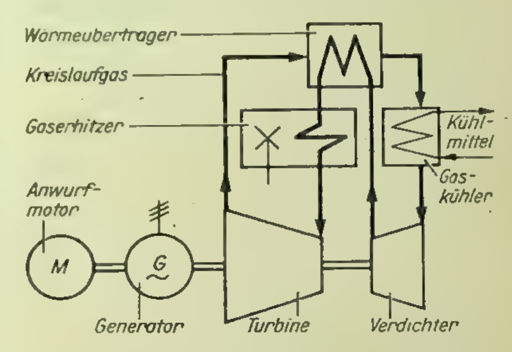


***Abb. 2.6.3-8** Geschlossene Gasturbinenanlage in Einwellenanordnung*

vor allem durch Verwendung hochwarmfester Werkstoffe, Berücksichtigung des Wärmedehnungsverhaltens der Bauteile, Kühlung von Beschaufelung, Rotor und Gehäuse u. a.

2.6.4. Kondensatoren

Kondensation stellt physikalisch die Umkehrung des Verdampfungsvorgangs dar, indem sich Dampf durch Wärmeabgabe an die Umgebung so weit abkühlt, daß er sich verflüssigt und dabei einer großen Volumenverminderung unterliegt. Entweder bildet das niedergeschlagene Kondensat einen ununterbrochenen Film auf der Kühlfläche (*Filmkondensation*), oder es entstehen vereinzelte, voneinander unabhängige Tropfen an der Kühlfläche (*Tropfenkondensation*).

Aufgaben von Kondensatoren. *Vakuumerzeugung*. Das durch die große Volumenverminderung entstandene Vakuum wird für den Kondensationsbetrieb im Kraftwerk benötigt, da mit der Herabsetzung des Kondensatordrucks das nutzbare Wärmegefälle in der Wärmekraftmaschine vergrößert und der thermische Wirkungsgrad des Prozesses verbessert wird. Gren-

Aufteilung auf mehrere Teilturbinen (Hochdruck- [HD-] Teil, Mitteldruck- [MD-] Teil und ein oder mehrere Niederdruck- [ND-] Teile) notwendig (Abb. 2.6.3-5), da bei den üblichen hohen Frischdampfparametern sehr viele Stufen zur Energieumsetzung benötigt werden, die Zahl der auf einem Läufer unterzubringenden Stufen jedoch beschränkt ist (je nach deren Bauart 15 bis 40). Der Abstand der Läuferlager muß in gewissen Grenzen gehalten werden, da sich sonst eine ungünstige kritische Drehzahl und schlechte Laufeigenschaften ergeben. Sämtliche Läufer der Teilturbinen sind durch starre Kupplungen miteinander verbunden. Am Eintritt des HD-Teils moderner *Heißdampfturbinen* treten hoher Dampfdruck (bis zu 24 MPa) und hohe Dampftemperatur (meist 535 oder 565 °C) auf, weshalb hier meist ein *Doppelmantelgehäuse* gewählt wird (Abb. 2.6.3-6). Druckdifferenz und Temperaturgefälle, die von innen nach außen entstehen und vom Gehäuse aufzunehmen sind, werden dadurch abgestuft, so daß die einzelnen *Gehäuseschalen* dünnwandiger und elastischer gehalten werden können. Moderne HD-Gehäuse werden aufgrund ihres dadurch günstigeren Wärmedehnungsverhaltens und der geringeren Lässigkeitsverluste (Energieverlust infolge

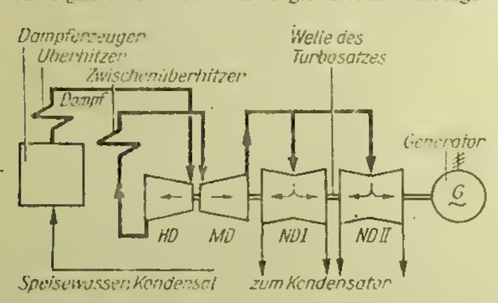


Abb. 2.6.3-5 ***Aufbau eines 500-MW-Turbosatzes aus mehreren Teilturbinen***

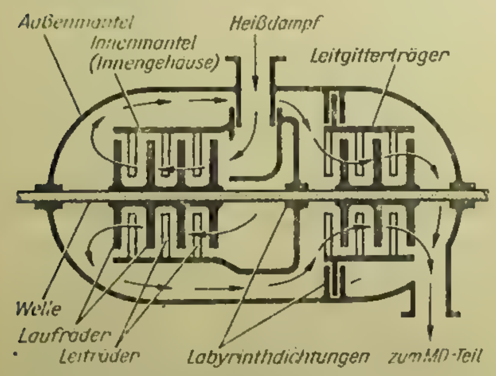


Abb. 2.6.3-6 ***HD-Teil einer Dampfturbine mit Doppelmantelgehäuse und Mitteneinströmung***

Dampfdurchlässigkeit der Außenstopfbuchsen) oft mit Mitteneinströmung gebaut (vgl. Abb. 2.6.3-6). Um das Arbeitsvermögen des Dampfs zu erhöhen, wird häufig eine einfache (vgl. Abb. 2.6.3-5) oder zweifache *Zwischenüberhitzung* (Tafel 9) im Dampferzeuger vorgenommen (vgl. 2.6.1.). Im ND-Teil von Dampfturbinen großer Leistung ist die Bewältigung des großen Dampfvolumens das entscheidende Problem. ND-Teil und z. T. auch der MD-Teil müssen deshalb bei großem Dampfdurchsatz mehrflutig (Aufteilung des Dampfstroms in mehrere parallele *Fluten*) ausgeführt werden, da ihre möglichen Abmessungen wegen des Festigkeitsverhaltens der Werkstoffe beschränkt sind. Der ND-Teil des 500-MW-Turbosatzes in Abb. 2.6.3-5 besteht z. B. aus 2 zweiflutigen ND-Gehäusen.

Einsatz – Leistungen. Die Dampfturbine ist die für die Elektroenergieerzeugung entscheidende Kraftmaschine (in der DDR erfolgt z. B. der Antrieb der Generatoren zu > 90 % durch Dampfturbinen, Tafel 11). Die Drehzahl der Kraftwerksturbinen liegt bei der in Europa üblichen *Netzfrequenz* von 50 Hz bei 3 000 U/min, lediglich bei großen Sattdampfturbinen von Kernkraftwerken z. T. auch bei 1 500 U/min. Bei einer Netzfrequenz von 60 Hz (USA) betragen die Turbinendrehzahlen entsprechend 3 600 bzw. 1 800 U/min. Dampfturbinen werden in der Energieversorgung entweder zur reinen Stromerzeugung oder – in *Industrie-* und *Heizkraftwerken* – gleichzeitig zur Stromerzeugung und *Wärmeversorgung* (Abgabe von Industrie- oder Heizdampf an bestimmte Verbraucher) eingesetzt, wobei man verschiedene Turbinenschaltungen unterscheidet. Zur Verbesserung des Prozeßwirkungsgrads sind bei allen Dampfturbinen großer Leistung *Anzapfungen* zum Vorwärmen des Speisewassers mit Anzapfdampf vorhanden. Die mit Druck- oder Siedewasserreaktoren ausgerüsteten Kernkraftwerke weisen *Sattdampfturbinen* auf. In den mit Hochtemperaturreaktoren oder schnellen Brutreaktoren ausgestatteten Kernkraftwerken können wie in konventionellen Dampfkraftwerken auf der Basis fossiler Brennstoffe *Heißdampfturbinen* zum Einsatz kommen. Die am meisten verbreiteten *einwelligen Dampfturbinen* baut man z. Z. für Leistungen bis 1 200 MW. Dampfturbinen größerer Leistung werden projektiert. Außer zur Elektroenergieerzeugung nutzt man Dampfturbinen auch zum Antrieb von Arbeitsmaschinen (z. B. Pumpen und Verdichter) und Schiffen.

Gasturbinen. *Arbeitsweise.* In einer Gasturbine wird ein Teil der Energie eines heißen Gases nach dem bei den Dampfturbinen erläuterten Arbeitsprinzip in mechanische Arbeit umgesetzt. Die Energieumsetzung in einer Gasturbinenstufe (meist mit 50 % Reaktion) und ihr Stufenaufbau ähneln denen einer Dampfturbinenstufe.

Aufbau – Bauarten. Bei *offenen Gasturbinenanlagen* komprimiert der Verdichter aus der Atmosphäre angesaugte Luft und fördert sie in die

Brennkammer. Dort wird flüssiger oder gasförmiger Brennstoff zugeführt und verbrannt. Die heißen Verbrennungsgase geben Energie an den Turbinenläufer ab, der den Verdichter und – bei Anlagen zur Stromerzeugung – den Generator antreibt, und entweichen in die Atmosphäre. Beim Anfahren der Anlage bis zum Zünden der Brennkammer liefert ein *Anwurfmotor* die Verdichterantriebsleistung. Dieser wird abgeschaltet, sobald die Turbine die Antriebsleistung aufbringt. Bei Verbrennungsgastemperaturen von 750 °C am Turbineneintritt erreicht eine einfache offene Gasturbinenanlage in *Einwellenanordnung* nach Abb. 2.6.3-7 einen Gesamtwirkungsgrad von ≈ 25 %. Einen besseren Wirkungsgrad kann man durch *mehrstufige Verdichtung* mit *Zwischenkühlung* und durch *Vorwärmen* der verdichteten Luft in einem *Rekuperator* (vgl. 2.6.5.) erreichen. Dazu werden die Gasturbinenanlagen in Abhängigkeit von der Leistungsgröße z. T. in *Mehrwellenanordnung* mit 2 bis 3 (HD-, MD-, ND-) Verdichtern und Turbinen in verschiedenen Schaltungen gebaut, wobei die einzelnen Stränge nur durch den Arbeitsmittelstrom gekoppelt sind und unterschiedliche Drehzahlen aufweisen können. Bei offenen Gasturbinenanlagen mit Leistungen bis ≈ 80 MW überwiegt heute die Einwellenanordnung in *Tuko-Bauweise*, d. h., Turbinen- und Kompressorbeschaufelung befinden sich auf einem gemeinsamen Rotor mit nur 2 Lagern.

In einer *geschlossenen Gasturbinenanlage* (Abb. 2.6.3-8) zirkuliert das Arbeitsmittel (Luft, Helium u. a.) ständig, und jegliche Wärmezu- und -abfuhr geschieht indirekt durch entsprechende Wärmeübertrager. Im Unterschied zu offenen Anlagen kann man sie mit höheren Absolutdrücken fahren und so bei gleichen Abmessungen eine höhere Leistung je Einheit erreichen. Außer für Öl und Gas kann der Gaserhitzer auch für feste Brennstoffe ausgelegt und in Zukunft – bei *nuklearen Gasturbinenanlagen* – sogar durch einen *Kernreaktor* ersetzt werden, da keine Verunreinigungen in den geschlossenen Arbeitsmittelkreislauf gelangen können.

Einsatz – Leistungen. Offene Gasturbinenanlagen (Tafel 11) mit Leistungen bis 100 MW werden in Spitzenlast- und fahrbaren Kraftwerken sowie in Verbindung mit Dampferzeuger und Dampfturbine in kombinierten *Gas-Dampf-Anlagen*, ferner als Notstromaggregate, Flugtriebwerke und Haupt- oder Zusatzantrieb auf Schiffen eingesetzt. Geschlossene Gasturbinenanlagen verwendet man vereinzelt in *Heizkraftwerken*, und es wird an Projekten für Kernkraftwerke mit geschlossenen Gasturbinenanlagen für Leistungen bis 1 000 MW gearbeitet.

Die wesentlichsten konstruktiven Probleme beim Bau von Gasturbinenanlagen ergeben sich aus der in der Brennkammer bzw. im Gaserhitzer und am Turbineneintritt auftretenden hohen Temperatur (≈ 650 bis 900 °C bei stationären Anlagen, ≈ 1 200 °C bei Strahltriebwerken). Man löst sie

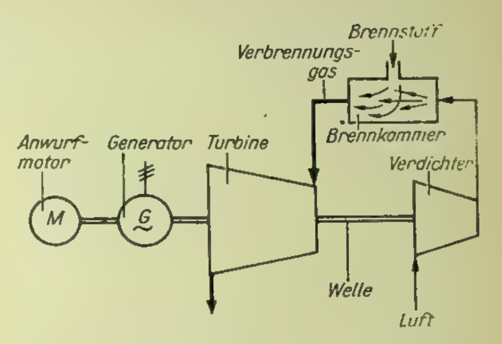


Abb. 2.6.3-7 Offene Gasturbinenanlage in Einwellenanordnung

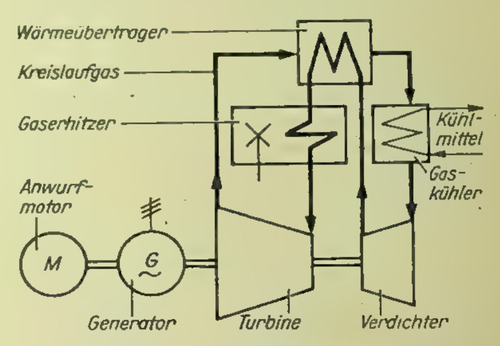


Abb. 2.6.3-8 Geschlossene Gasturbinenanlage in Einwellenanordnung

vor allem durch Verwendung hochwarmfester Werkstoffe, Berücksichtigung des Wärmedehnungsverhaltens der Bauteile, Kühlung von Beschaufelung, Rotor und Gehäuse u. a.

2.6.4. Kondensatoren

Kondensation stellt physikalisch die Umkehrung des Verdampfungsvorgangs dar, indem sich Dampf durch Wärmeabgabe an die Umgebung so weit abkühlt, daß er sich verflüssigt und dabei einer großen Volumenverminderung unterliegt. Entweder bildet das niedergeschlagene Kondensat einen ununterbrochenen Film auf der Kühlfläche (*Filmkondensation*), oder es entstehen vereinzelte, voneinander unabhängige Tropfen an der Kühlfläche (*Tropfenkondensation*).

Aufgaben von Kondensatoren. *Vakuumerzeugung*. Das durch die große Volumenverminderung entstandene Vakuum wird für den Kondensationsbetrieb im Kraftwerk benötigt, da mit der Herabsetzung des Kondensatordrucks das nutzbare Wärmegefälle in der Wärmekraftmaschine vergrößert und der thermische Wirkungsgrad des Prozesses verbessert wird. Gren-

zen ergeben sich aus der Temperatur des Kühlwassers und den Ausführungsformen der Kraftmaschine.
Kondensatrückgewinnung. Der Kondensator gewährleistet den geschlossenen Kreislauf des Arbeitsmittels. Damit wird erreicht, daß Anlagen und Kosten zur Speisewasseraufbereitung in wirtschaftlichen Grenzen bleiben.
Entgasung des Kondensats. Jeder Kondensator soll so ausgelegt sein, daß die nichtkondensierbaren Bestandteile des Dampfs und die frei werdenden, im Kondensat gelösten Gase mittels besonderer Pumpen abgesaugt werden können.
Kondensator-Bauarten. Der Oberflächenkondensator ist ein dichter, oft zylindrischer Behälter, in dem sich ein axial von Kühlwasser durchflossenes Rohrsystem befindet. Der zu kondensierende Dampf tritt quer zur Achse ein und kondensiert außen am Rohrbündel. Der Misch- oder Einspritzkondensator ist ein zylindrischer Behälter ohne Rohre, in dem in bestimmter Anordnung Wasser eingespritzt wird, an dessen Teilchen der im Behälter vorhandene Dampf kondensiert. Der *Luftkondensator* besteht aus einem Rippenrohrsystem ohne Ummantelung, in dem der Dampf durch Wärmeabgabe an die außen entlangströmende Luft kondensiert.

2.6.5. Wärmeübertrager

Wärmeübertrager, oft auch *Wärme(aus)tauscher* genannt, sind Apparate, die von 2 oder mehr Medien durchströmt werden, deren eines Wärme an die übrigen abgibt.
Rekuperatoren sind kontinuierlich nach dem Gegen-, Quer- und Gleichstromprinzip arbeitende Wärmeübertrager ohne Speicherung der Wärme, wobei die Medien durch Trennwände voneinander getrennt sind (z. B. Rohrbündel-Wärmeübertrager, Verdampfer, Kondensator).
Regeneratoren arbeiten diskontinuierlich und mit Speicherung der Wärme. Sie enthalten stets eine gerade Anzahl von Kammern, deren eine Hälfte durch Abgabe erhitzt wird, während die andere Hälfte durch die zu erwärmenden Frischgase abkühlt. Eine Anwendung erfolgt z. B. in der Hüttenindustrie (Siemens-Martin-Ofen).
Kühltürme sind spezielle Wärmeübertrager, in denen durch die direkte Berührung von zu kühlendem Wasser mit der Luft ein *Stoff- und Wärmeübergangsprozeß* (Verdunstung) als Kühlvorgang stattfindet. Das Wasser läuft hierbei über ein Rieselsystem (Holzlatten, Asbestzementplatten, PVC-Einbauten), wobei man je nach Strömungsrichtung Gegen- und Querstromanlagen unterscheidet. Die Förderung der Luft geschieht entweder mittels Ventilatoren (*Ventilatorkühlturm*) oder durch die Kaminwirkung eines Schlotes (*Naturzugkühlturm*). Kühltürme finden großtechnisch Anwendung in Kraftwerken zur Rückkühlung des Kühlwassers im Dampfkraftprozeß.

2.6.6. Pumpen und Verdichter

Sie nehmen in der Volkswirtschaft als Rationalisierungsmittel, als integrierter Bestandteil chemischer oder physikalisch-technischer Anlagen sowie als Arbeitsmaschinen in der Energietechnik eine zentrale Stellung ein. In der Kerntechnik und Elektronik sind leistungsfähige

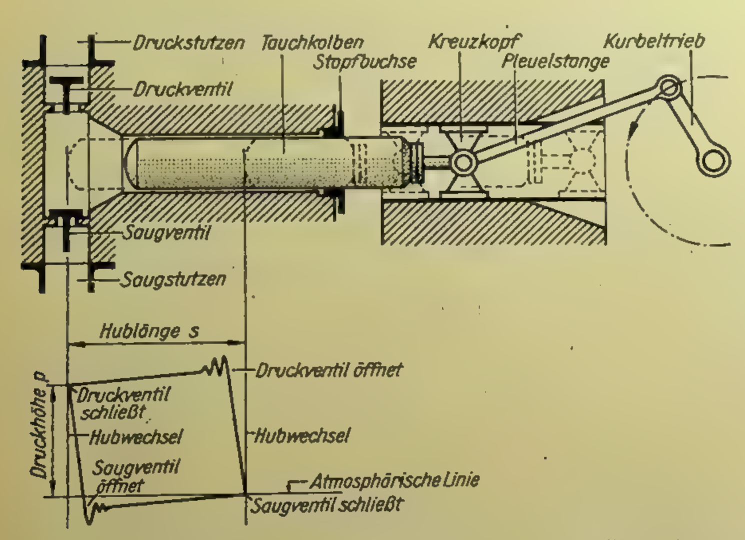


Abb. 2.6.6-1 Einfachwirkende Kolbenpumpe, darunter Indikatordiagramm

Hochvakuumpumpen unerläßlich. Als Kondensat-, Kühlwasser-, Kesselspeise- und Umwälzpumpen gehören diese Pumpentypen zu jedem modernen Dampfkraftwerk. In gleichen Anlagen sind Saugzug- und Unterwindlüfter als besondere Verdichterarten für einen optimalen Verbrennungsprozeß entscheidend.

Pumpen werden ganz allgemein als Arbeitsmaschinen zur Förderung von reinen, verschmutzten, aggressiven und leicht gasenden Flüssigkeiten, von Dickstoffen sowie Suspensionen definiert. Pumpen können für einen Förderstrom von 10^{-6} m^3/h (Dosierpumpen) bis 10^6 m^3/h (Kühlwasser- und Speicherpumpen für die Energiewirtschaft) sowie für eine Förderhöhe von wenigen Metern Flüssigkeitssäule bis zu einem Enddruck von 10^9 Pa eingesetzt werden. Bauart und Wirkungsweise des Förderelements dienen primär als Klassifikationsmerkmale.

Hubkolbenpumpen weisen ein oszillierendes Verdrängerelement auf; nach seiner Form unterscheidet man Kolben- und Membranpumpen.

Kolbenpumpen. Während beim einfachwirkenden Typ (Abb. 2.6.6-1) nur ein Fördergang während eines Doppelhubs möglich ist, werden beim doppeltwirkenden Typ je Doppelhub 2 Fördervorgänge erreicht.

Je nach der Kolbenform spricht man von Scheiben-, Tauch-, Stufen-, Flügel- oder Ventilkolbenpumpe. Der Antrieb einer Kolbenpumpe kann sowohl direkt auf den Kolben mittels Dampf oder Druckluft, über einen Kurbeltrieb mit Diesel- oder Elektromotor oder auch von Hand (Handkolbenpumpe) geschehen. Selbsttätige Arbeitsventile steuern den Ansaug- und Fördervorgang der Pumpe. Die Abdichtung des Kolbens und der Kolbenstange übernehmen Kolbenringe, -manschetten, Lippendichtungen oder Weichpackungen. Der besondere Vorteil der Kolbenpumpe gegenüber anderen Pumpenbauarten ist das sichere Ansaugvermögen bis zu einer Saughöhe von ≈ 9 m. Die Druckverhältnisse innerhalb des Pumpenzylinders während des

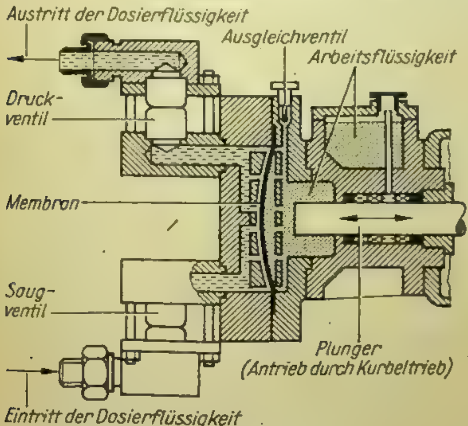


Abb. 2.6.6-2 *Membranpumpe mit hydraulischem Antrieb*

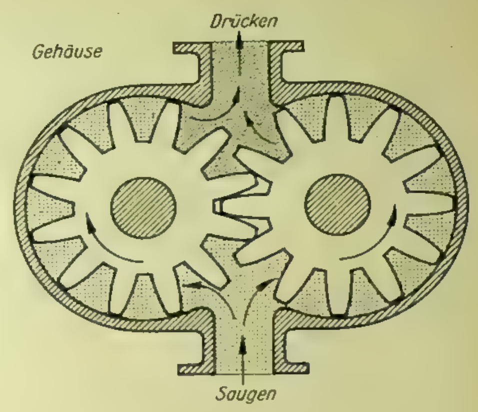


Abb. 2.6.6-3 *Zahnradpumpe*

Saug- und Druckvorgangs sind aus dem sog. Indikatordiagramm ersichtlich (vgl. Abb. 2.6.6-1).

Membranpumpen. Hier dient eine allseitig eingespannte elastische, metallische oder nichtmetallische Membran als Förderelement. Diese Membran wird entweder direkt von einem Kurbeltrieb oder indirekt über eine Arbeitsflüssigkeit angetrieben, die von einer Kolbenpumpe rhythmisch zum Schwingen gebracht wird (Abb. 2.6.6-2). Das Fehlen von Stopfbuchsen ermöglicht eine völlig leckfreie Förderung, was besonders bei radioaktiven oder giftigen Flüssigkeiten von Bedeutung ist.

Umlaufkolbenpumpen haben keinen Kurbeltrieb und zeichnen sich bei modernen Bauarten durch ventillose Arbeitsweise gegenüber Hubkolbenpumpen aus. Im folgenden soll nur auf die wichtigsten Arten eingegangen werden, die vor allem in Hydraulikanlagen (vgl. 9.2.) und als Brennerpumpen in ölbeheizten Dampferzeugern anzutreffen sind.

Zahnradpumpen verdrängen das Fördermittel von der Saug- zur Druckseite hin in den Zahnlücken ihrer Räder. Man unterscheidet außen- und innenverzahnte sowie ein- und mehrströmige Zahnradpumpen. Die außenverzahnte Einstrom-Zahnradpumpe (Abb. 2.6.6-3) dominiert.

Schrauben- oder *Spindelpumpen* erzielen den Fördereffekt durch rotierende Spindeln mit eingefrästem Gewinde großer Steigung. In der Einspindelpumpe rotiert eine eingängige Schraubenspindel in einem zweigängigen Stator aus elastischem Werkstoff. Die Verdrängung der Förderflüssigkeit geschieht ähnlich wie bei Zahnradpumpen in den Gewindegängen (vgl. Abb. 9.2.3-3).

Zellen- oder *Drehkolbenpumpen* sind Konstant- oder Verstellpumpen. Zur Wirkungsweise vgl. Abb. 9.2.3-4.

Kreiselradpumpen fördern im Unterschied zu den Verdrängerpumpen nach dem dynamischen Prinzip. Ein in einem Spiral- oder Ringgehäuse rotierendes Laufrad überträgt auf die Förderflüssigkeit kinetische Energie, die in einem nachgeschalteten Diffusor oder Leitrad teilweise in Druckenergie umgewandelt wird. Die Strömungs- und Geschwindigkeitsverhältnisse in einem Laufrad radialer Bauart sind in Abb. 2.6.6-4 wiedergegeben. Grundsätzlich werden Kreiselradpumpen in Kreisel- und Seitenkanalpumpen unterschieden. Die Bezeichnung Seitenkanal rührt von einem seitlich zum Laufrad angeordneten Verdrängungskanal her.

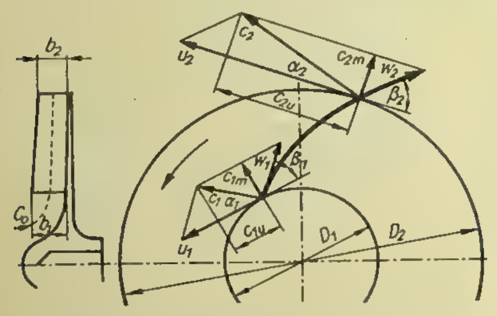


Abb. 2.6.6-4 Strömungs- und Geschwindigkeitsverhältnisse im radialen Laufrad

Nach dem Strömungsaustritt des Fördermediums im Laufrad selbst klassifiziert man die Bauarten der Kreiselpumpen (Abb. 2.6.6-5). Die Seitenkanalpumpen werden ebenfalls nach der Laufradart in Sternrad- und Peripheralradpumpen unterschieden.

Kreiselpumpen sind im Unterschied zu Hub- und Umlaufkolben- sowie Seitenkanalpumpen nicht selbstansaugend. Vor Inbetriebnahme muß daher die Saugleitung der Pumpe, die mit einem Fußventil versehen sein muß, bis zur obersten Kante des Laufrads mit Förderflüssigkeit gefüllt werden. Durch Zusatzeinrichtungen, z. B. eine vorgeschaltete Seitenkanalpumpe, können aber Kreiselpumpen auch zum Selbstansaugen hergerichtet werden. Die Regelung von Förderstrom und -höhe geschieht bei Kreiselpumpen durch

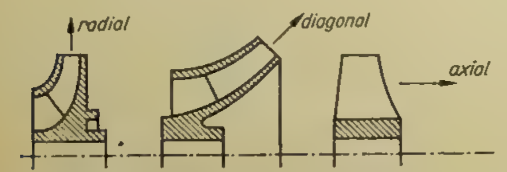


***Abb. 2.6.6-5** Klassifizierung der Kreiselpumpen nach der Richtung des Strömungsaustritts aus den Laufrädern*

Drosseln des Druckschiebers oder bei Kesselspeisepumpen, die mit Dampfturbine angetrieben werden, mittels Drehzahländerung. Bei Kreiselpumpen axialer Bauart kann diese Regelung durch während des Betriebs mögliche Schaufelverstellung erfolgen. Größere Förderhöhen werden durch Hintereinanderschaltung, große Förderströme, durch parallele Schaltung oder doppelflutige Ausbildung von Laufrädern radialer oder diagonaler Bauart erreicht.

Kreiselpumpen radialer Bauart sind heute die dominierende Pumpentypen. Sie werden auch in verschiedenen Modifikationen, so z. B. als Unterwassermotorpumpe zur Entwässerung von Braunkohlenflözen sowie als stopfbuchsenlose Kreiselpumpe, die besonders in der Chemieindustrie, der Energiewirtschaft und in der Heizungstechnik (Warmwasserumwälzpumpe) verwendet wird, gebaut.

Pumpenapparaturen. Aus deren Vielzahl haben vor allem die Druckluft- oder Mammut- und die Strahlpumpen Bedeutung. Bei der Druckluftpumpe (Abb. 2.6.6-6) wird über eine Mischdüse Druckluft in die Förderflüssigkeit geblasen, so daß ein Flüssigkeits-Luft-Gemisch geringer Dichte entsteht, das im Steigrohr aufwärts steigt.

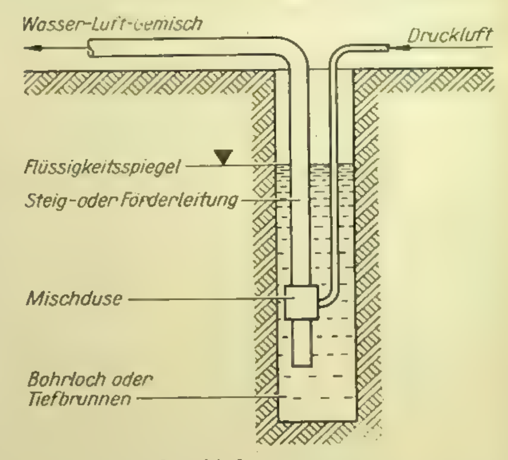


***Abb. 2.6.6-6** Druckluftpumpe*

Dieser Typ wird besonders zur Förderung stark schleißender Fördergüter, wie z. B. Sand oder Kies, eingesetzt. In der Strahlpumpe wird der Fördereffekt durch Injektorwirkung eines Flüssigkeits-, Luft- oder Dampftreibstrahls erreicht.

Verdichter, auch *Kompressoren* genannt, sind Arbeitsmaschinen, die die Druck- oder kinetische Energie gas- oder dampfförmiger Medien nach statischem oder dynamischem Prinzip erhöhen. Sie werden in erster Linie nach dem Druckverhältnis klassifiziert, d. h. nach dem Quotienten zwischen End- und Anfangsdruck. Danach bezeichnet man als *Lüfter* einen Verdichter mit einem Druckverhältnis 1 bis 1,1, als

Gebläse einen solchen mit 1,1 bis 3 und spricht von Verdichter im engeren Sinne erst ab einem Quotienten > 3. Nach dem Funktionsprinzip und der Bauart des Verdichtungselements unterscheidet man wie im Pumpenbau Hubkolben-, Umlaufkolben- und Kreiselradverdichter.

Die Verdichtung eines Gases geschieht nach physikalischen Gesetzen, wobei dem von *Boyle-Mariotte* die größte Bedeutung zukommt, wonach das Produkt von Druck und spezifischem Volumen im Anfangsstadium (P_1; V_1) gleich dem im Endzustand (P_2; V_2) ist. Während der Verdichtung tritt eine Erwärmung des verdichteten Gases ein. Die Temperaturerhöhung läßt sich nach der allgemeinen Gasgleichung annähernd ermitteln, wobei T die absolute Temperatur darstellt ($273 + t$ in °C).

Je nach dem Druckverhältnis und der Gasart muß dem verdichteten Gas die Wärme über Zwischenkühler wieder entzogen werden. Durch Zylinder- oder Gehäusekühlung ist dies nur zu 10 bis 20% möglich. Die Obergrenze des Druckverhältnisses in einer Verdichterstufe hängt daher wesentlich von der Funktionstüchtigkeit und Leistungsfähigkeit der Zwischenkühler und von der optimalen thermodynamischen Auslegung des Verdichtungsprozesses ab. Die thermodynamische Güte des Verdichtungsprozesses drückt der isothermische Wirkungsgrad aus.

Hubkolbenverdichter. Funktionsweise und Druckverhältnisse während des Ansaug- und Verdichtungshubs innerhalb des Zylinders zeigt Abb. 2.6.6-7. Nach Art des Verdrängerelements werden wie bei Pumpen *Kolben-* und *Membranverdichter*, nach Art der Strömungsrichtung des Gases im Zylinder *Gleich-* und *Wechselstromverdichter* und nach Lage der Zylinder liegende, stehende, Winkel-, Boxer-, V- und W-Bauart unterschieden.

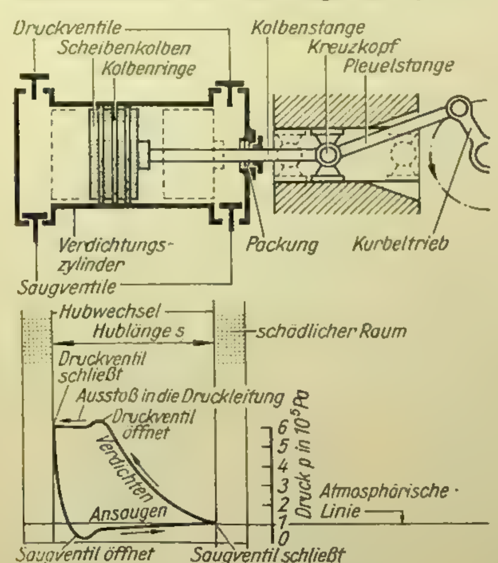


Abb. 2.6.6-7 Doppeltwirkender Kolbenverdichter mit Indikatordiagramm

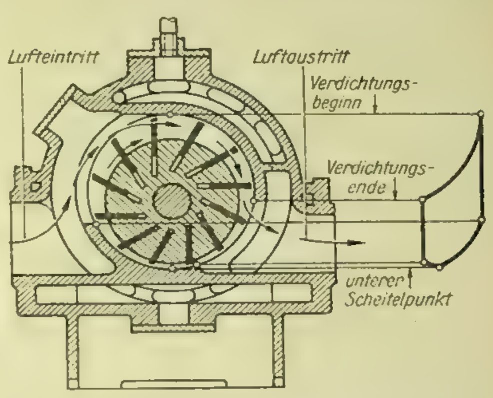


Abb. 2.6.6-8 Zellenverdichter mit dargestellten Druckverhältnissen im Verdichtungsraum

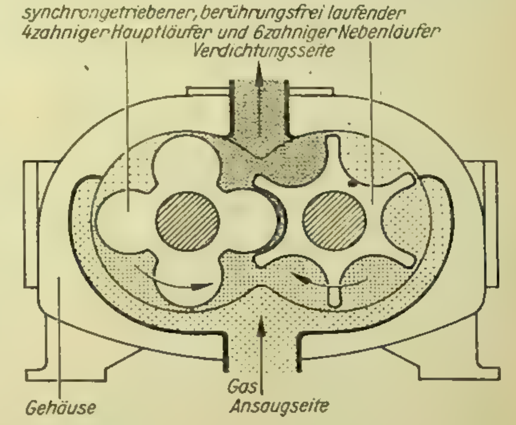


Abb. 2.6.6-9 Schraubenverdichter

Umlaufkolbenverdichter haben prinzipiell eine ähnliche Wirkungsweise wie Umlaufkolbenpumpen. 2 Arten dominieren heute in der Industrie.

Zellenverdichter. Arbeitsweise und Druckverlauf innerhalb des Verdichters sind aus Abb. 2.6.6-8 ersichtlich. In ein- und zweistufiger Ausführung kann ein maximaler Enddruck von 4 bzw. 9 · 10^4 Pa erreicht werden. Bei innerer Kühlung durch Öleinspritzung ist in einstufiger Ausführung ein Enddruck von max. 8 · 10^4 Pa möglich.

Die in die Rotorschlitze eingesetzten Schieber (vgl. Abb.) sind in der Regel aus Stahl, bei niedrigen Druckverhältnissen aber auch aus Plastwerkstoffen gefertigt.

Schraubenverdichter besitzen als Verdichtungselemente vorzugsweise einen vierzahnigen Haupt- und sechszahnigen Nebenläufer (Abb. 2.6.6-9). Das in die freien Gänge des

Schraubenpaars einströmende Gas wird von der unteren Ansaug- zur oberen Verdichterseite hin entsprechend dem Steigungswinkel des Gewindes unter Volumenverringerung verdrängt. Die beiden Läufer werden über ein Synchronzahnrad angetrieben, das einen berührungsfreien Lauf und damit eine ölfreie Verdichtung gewährleistet. Die Grenze des Druckverhältnisses liegt bei einstufiger Ausführung bei $P_2/P_1 = 4$, in zweistufiger Ausführung bei $P_2/P_1 = 10$. Mit innerer Kühlung durch Öleinspritzung läßt sich in einstufiger Ausführung ebenfalls ein Wert von $P_2/P_1 = 10$ erreichen. Dabei geht allerdings der Vorzug der ölfreien Verdichtung verloren.

Kreiselradverdichter gleichen in Wirkungsweise und Klassifikationsmerkmalen im Prinzip den Kreiselradpumpen. Allerdings erfordert die niedrige Dichte von Gasen gegenüber Flüssigkeiten eine wesentlich höhere Umfangsgeschwindigkeit (bis 325 m/s) und damit auch andere Laufradkonstruktionen für Kreiselradverdichter. Die Strömungs- und Geschwindigkeitsverhältnisse in einem radialen Verdichterlaufrad (Tafel 10) sind in Abb. 2.6.6-4 dargestellt. Die in schallnaher und teilweise in Überschallströmungsgeschwindigkeit arbeitenden Laufräder werden aus hochfestem, legiertem, metallischem Werkstoff geschmiedet und im Hochvakuum mit Elektronenstrahl geschweißt oder aus dem vollen gefräst.

Kreiselverdichteraggregate radialer, mehrgehäusiger Bauart können für Druckerhöhungen von $3 \cdot 10^7$ Pa und einen Förderstrom bis $2 \cdot 10^5$ m^3/h eingesetzt werden.

Dem Kreiselverdichter axialer Bauart bleibt der Bereich niedriger Druckerhöhung (Druckverhältnis bis max. 8) und großen Förderstroms (10^5 bis 10^6 m^3/h) vorbehalten.

Der Förderstrom kann außer durch Drehzahländerung auch durch eine der ersten Verdichterstufe vorgeschaltete Vordralldrossel geregelt werden.

2.7. Kältetechnik

Aufgabe der Kältetechnik ist es, einem Körper Wärme zu entziehen und dadurch dessen Temperatur zu senken oder ihn auf einer Temperatur zu halten, die tiefer als die Umgebungstemperatur ist.

Wesentliche Anwendungsgebiete sind die *Kühlung von Nahrungsmitteln*, die *Klimatisierung* von Arbeits-, Wohn- und Aufenthaltsräumen sowie von Produktionsstätten, in denen zum Erreichen der Qualitätsforderungen an das Erzeugnis, z. B. Chemiefasern, ein bestimmter Luftzustand erforderlich ist, und in der Medizin die Kühlung von Blut, Knochen und Gewebeteilen, die für Transfusionen bzw. Transplantationen aufbewahrt werden.

Auf der Möglichkeit, mit Hilfe von Kältemaschinen tiefere Temperaturen zu erzeugen, als sie von der Natur zur Verfügung gestellt werden, basiert das breite industrielle Anwendungsgebiet der *Trennung von Flüssigkeits- und Gasgemischen*. Zum Beispiel werden bei der Luftzerlegung Stickstoff für die Ammoniaksynthese, Sauerstoff zum autogenen Schweißen und Trennen, zur Vergasung fester und flüssiger Brennstoffe sowie die Edelgase Argon, Helium, Neon, Krypton und Xenon für das Schutzgasschweißen und die Lichttechnik sowie für weitere Anwendungsfälle gewonnen. Dabei sind z. B. zur Gewinnung von Helium und Neon Temperaturen von -250 °C erforderlich.

2.7.1. Prinzipielle Verfahren der Kältetechnik

Kälteleistung kann einmal bei konstanter und zum anderen bei veränderlicher Temperatur bereitgestellt werden. Dabei sind *Verschleißprozesse* von *thermischen Kreisprozessen* in Kältemaschinen zu unterscheiden.

Verschleißprozesse bei konstanter Temperatur sind die *Wassereis*- und die *Trockeneiskühlung*, bei veränderlicher Temperatur ist es die Kühlung mittels einer *Kältemischung*.

Das Wesen des *thermischen Kältemaschinen-Kreisprozesses* besteht darin, daß ein flüssiges oder gasförmiges *Kältemittel* bei niedrigen Temperaturen aus dem Kühlgut Wärme aufnimmt, das auf diese Weise abgekühlt bzw. auf tiefer Temperatur gehalten wird und die so aufgenommene Wärmemenge dann bei höherer Temperatur an die Umgebung abgibt. Da Wärme nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen mit hoher übergeht, muß mechanische Arbeit geleistet werden, um die Wärme auf die höhere Temperatur zu heben. Maschinen, die thermische Kreisprozesse mit diesem Ziel ablaufen lassen, nennt man deshalb *Wärmepumpen*.

In der *Kaltdampfmaschine* verdampft unter Wärmeaufnahme aus dem Kühlgut ein flüssiges Kältemittel. Die Kälteleistung wird daher bei konstanter Temperatur zur Verfügung gestellt. Nach der Art der Verdichtung des Kältemittels unterscheidet man *Kompressionskältemaschinen*, *Sorptionsmaschinen* und *Strahlkältemaschinen*. Kaltdampfmaschinen werden zum Erreichen von Temperaturen bis zu -100 °C eingesetzt.

Thermoelektrische Kältemaschinen arbeiten unter Ausnutzung des *Peltier-Effekts*, nach dem in einem Stromkreis aus 2 Metallen, *Thermopaar* genannt, und 2 Lötstellen bei Stromfluß die eine Lötstelle sich abkühlt, die andere sich erwärmt. Die aufgenommene bzw. die abgegebene Wärmemenge sind der Stromstärke proportional und

von den im Thermopaar verwendeten Stoffen abhängig. Bei Thermopaaren aus reinen Metallen sind die Temperaturänderungen gering. Bei Verwendung von Halbleitern, z. B. einer Legierung aus Antimontellurid Sb_2Te_3 und Wismuttellurid Bi_2Te_3 auf der einen und einer Legierung aus Bi_2Te_3 und Wismutselenid Bi_2Se_3 auf der anderen Seite, wurden maximale Temperaturdifferenzen bis zu 60°C erreicht. In der UdSSR und in den USA werden auf dieser Basis Kälteanlagen für Kühlschränke entwickelt. Wenn es mit diesen Anlagen gelingt, die gleichen Leistungskennziffern wie mit modernen Kompressionskältemaschinen zu erreichen, könnten sie die z. Z. üblichen Haushaltkühlschrankaggregate ablösen.

2.7.2. Die wichtigsten Kältemaschinen

Kompressionskältemaschinen. Eine einstufige Maschine besteht aus Verdichter, Drosselventil und den beiden Wärmeübertragern, Verdampfer und Kondensator (Abb. 2.7.2-1). Im Verdampfer verdampft das Kältemittel bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck, indem es dem Kühlgut Wärme entzieht. Der Verdichter saugt den Kältemitteldampf an und verdichtet ihn unter Aufnahme mechanischer Arbeit. Bei hohem Druck wird der Kältemitteldampf im Kondensator durch Wärmeabgabe an die Umgebung verflüssigt und anschließend über das Drosselventil in den Verdampfer entspannt, wobei sich die Flüssigkeit erheblich abkühlt. Wird z. B. bei Verwendung von Ammoniak als Kältemittel im Verdampfer ein Druck von 0,24 MPa eingestellt, so verdampft das durch Drosselentspannung abgekühlte Ammoniak bei −15°C und nimmt dabei eine Wärmemenge von 1,1 MJ/kg aus dem Kühlgut auf. Wird der entstehende Kältemitteldampf dann auf 1,18 MPa verdichtet, so kondensiert er bei +30°C. Die Kondensationswärme

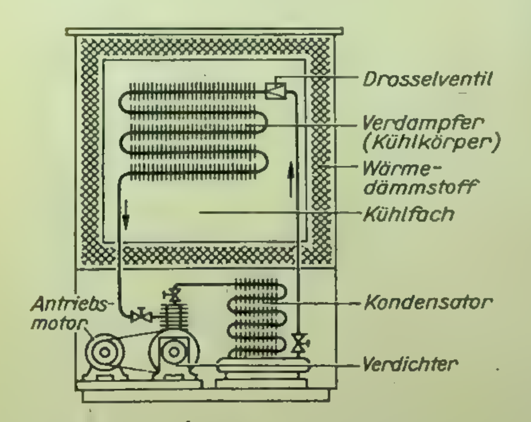


Abb. 2.7.2-1 Einstufige Kaltdampf-Kompressionskältemaschine in einem Haushaltkühlschrank

gibt er dabei an die kühlere Umgebung ab. Bedingen die geforderte Kälteleistung und die Kühltemperatur ein höheres Druckverhältnis zwischen Kondensator und Verdampfer als 5, dann ist eine *mehrstufige Kältemaschine*, d. h. mehrstufige Verdichtung mit Zwischenkühlung, einzusetzen.

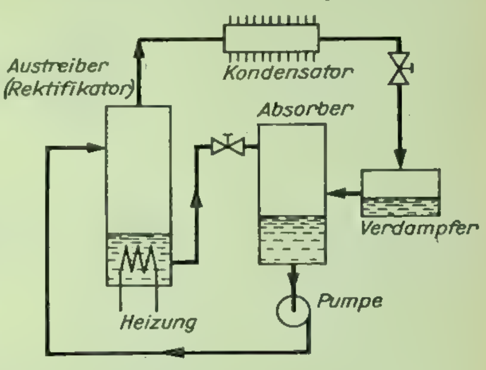


Abb. 2.7.2-2 Schema einer einstufigen Absorptionskältemaschine

Kältemittel für Kompressionskältemaschinen müssen günstige thermodynamische Eigenschaften aufweisen, sie dürfen nicht brennbar, nicht explosibel, nicht giftig, müssen gegenüber Werk- und Hilfsstoffen in der Maschine chemisch inaktiv, kostengünstig zu beschaffen sowie möglichst einfach und rein herstellbar sein. Am besten eignen sich *Ammoniak* und *Freone* bzw. *Frigene* (halogenierte Kohlenwasserstoffe).

Sorptionsmaschinen beruhen auf dem Prinzip, daß Gase oder Dämpfe unter bestimmten Bedingungen an einen anderen Stoff, Lösungsmittel genannt, gebunden und unter anderen Bedingungen wieder ausgetrieben werden können. Die Verdichtung geschieht hier durch Anlagerung des reinen Kältemittels an den zweiten im Kreislauf befindlichen Stoff. Die dem System zugeführte Energie dient dann in einer anschließenden Prozeßstufe zur Trennung des Kältemittels von dem zweiten Medium. Die bei der Anlagerung frei werdende Wärme wird an die Umgebung abgeführt, während die Energie für den Trennvorgang als Heizwärme aufgenommen wird. Für Haushaltkühlschränke bietet die Sorptionsmaschine den Vorteil, daß sie ohne bewegliche Teile auskommen kann, die dem Verschleiß unterliegen und Geräusche verursachen. Allerdings haben sie einen weitaus schlechteren Wirkungsgrad als Kompressionsmaschinen.

Abb. 2.7.2-2 zeigt die Arbeitsweise einer einfachen, einstufigen Absorptionsanlage. In den Rektifikator oder Austreiber wird ein Gemisch, z. B. Wasser und Ammoniak, eingespeist und

durch Wärmezufuhr zum Sieden gebracht. Der dadurch ausgetriebene NH_3-Kältemitteldampf wird im Kondensator niedergeschlagen. Die entstehende Flüssigkeit kühlt sich beim Entspannen in den Verdampfer stark ab. Dort verdampft sie durch Wärmeaufnahme aus dem Kühlgut. Der entstehende Dampf strömt in den Absorber, in den auch die Restflüssigkeit aus dem Rektifikator entspannt wird. Sie rieselt durch den Dampf und absorbiert ihn dabei. Die entstehende Absorptionswärme wird an die Umgebung abgeführt. Die Kältemittellösung wird in den Rektifikator gepumpt, wo der Kreislauf mit der Trennung des Gemischs von neuem beginnt.

Kaltgasmaschinen arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie die Kaltdampf-Kompressionskältemaschinen, nur ändert sich der Aggregatzustand des Kältemittels, z. B. Luft, nicht. Zum Erreichen tiefer Temperaturen, wie sie z. B. zur Verflüssigung und anschließenden Zerlegung von Luft erforderlich sind, werden mehrstufige Anlagen mit Zwischenkühlung zwischen den Verdichtungsstufen angewendet. Der Anwendungsbereich liegt zwischen −50°C und dem absoluten Nullpunkt.

2.7.3. Kältetransport

Kälte wird in Großanlagen von der Kältemaschine zum Ort der Nutzung, z. B. dem Kühlraum oder der Klimaanlage, mit Hilfe einer *Kühlsole* transportiert. Kühlsolen sind wäßrige Lösungen von Kochsalz, Magnesiumchlorid, Kalziumchlorid oder auch von organischen Stoffen, wie z. B. Glysantin, die weit unter dem Gefrierpunkt des Wassers noch flüssig sind. Die Kälteleistung wird durch Wärmeaustausch an die Sole abgegeben, die sich dabei abkühlt, und erst durch nochmaligen Wärmeaustausch, z. B. mit der Luft im Kühlhaus, dem eigentlichen Zweck zugeführt. Neben ihrer Hauptaufgabe, dem Kältetransport, hat die Sole oft noch den Zweck, Kälte zu speichern. Durch *Kältespeicherung* bei veränderlicher Soletemperatur ist es möglich, Belastungsschwankungen, wie sie z. B. bei Kunsteisbahnen auftreten, auszugleichen und die Kältemaschine für eine mittlere Belastung auszulegen.

2.7.4. Herstellung von Trockeneis

Trockeneis in Form von festem Kohlendioxid hat gegenüber Wassereis folgende Vorzüge:

1. Es geht unter Umgebungsdruck bei ≈ −80 °C ohne einen Rückstand zu hinterlassen direkt in den gasförmigen Zustand über, während bei Verwendung von Wassereis Schmelzwasser abgeführt werden muß, das auch die Gefahr der Korrosion erhöht.

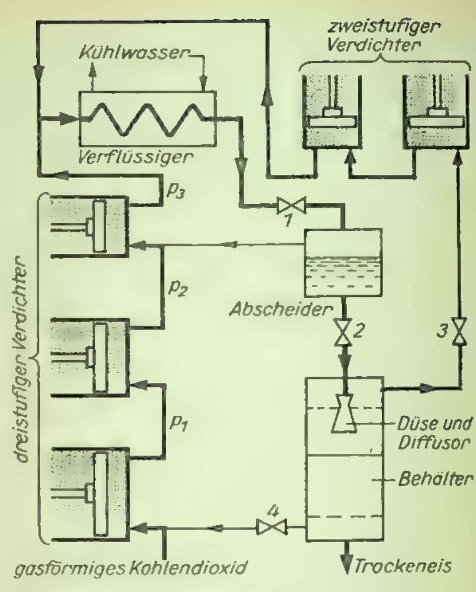


Abb. 2.7.4-1 Carba-Verfahren zur Trockeneisherstellung

2. Trockeneis bringt im Vergleich zu Wassereis je Kilogramm die 1,9fache und je Kubikmeter sogar die 3,3fache Kälteleistung.

Es eignet sich daher insbesondere zur Transportkühlung und in Fällen, in denen der Einsatz einer Kältemaschine wegen zu geringer Betriebsstunden nicht rentabel ist.

Das Kohlendioxid kann aus Abgasen von Verbrennungsprozessen, als Abfallprodukt des Kalkbrennens oder aus Gärprozessen gasförmig gewonnen und nach sorgfältiger Reinigung durch verschiedene Verfahren zu Trockeneis verarbeitet werden. Weit verbreitet ist das *Carba-Verfahren* (Abb. 2.7.4-1). Dabei wird das in die Anlage eintretende CO_2 bei geschlossenem Ventil *4* dreistufig verdichtet und anschließend durch Abkühlung verflüssigt. Die Flüssigkeit entspannt sich über das Ventil *1* in einen Abscheider auf den Druck p_2 und kühlt sich dabei ab. Der entstehende Dampf wird von der dritten Verdichterstufe angesaugt, während die Flüssigkeit über das Ventil *2* und eine Düse auf ≈ 0,5 MPa entspannt wird. Dabei kühlt sie sich so weit ab, daß ein Gemisch aus Dampf, Flüssigkeit und festem CO_2 entsteht. Der Dampf gelangt über einen zweistufigen Verdichter wieder in den Kreislauf, während das lockere Trockeneis durch kurzzeitiges Öffnen des Ventils *4* infolge der Druckdifferenz zu einem festen Block verdichtet wird.

2.7.5. Transport bei tiefen Temperaturen

Kühltransporte mit Schiff, Eisenbahn und Kraftfahrzeug haben insbesondere für tiefgekühlte

und gefrostete Nahrungsmittel Bedeutung, da die Kühlkette von der Erzeugung bis zum Verbrauch nicht unterbrochen werden darf.
Auf Schiffen werden zur Kühlung von Frachtgut, Proviant und Trinkwasser fast ausschließlich einstufige Kaltdampf-Kompressionskältemaschinen (vgl. 2.7.1.) eingesetzt. Zum Transport von gefrorenem Fleisch und Fisch sowie zum Einfrieren von Fisch auf Fischverarbeitungsschiffen sind Temperaturen von −30 bis −40°C erforderlich, die von zweistufigen Anlagen bereitgestellt werden.
Eisenbahnkühlwaggons werden in einem Temperaturbereich von +3 bis +7°C mit Wassereis und in einem Bereich von −5 bis −10°C mit Eis-Salz-Mischungen oder mit Trockeneis gekühlt. Für die Kühlung mittels Wassereis bzw. einer Eis-Salz-Mischung befinden sich an den Stirnwänden 2 Eisbunker mit je 2,4 t Fassungsvermögen. Trockeneisbunker mit einem Fassungsvermögen von 850 kg sind an der Decke des Waggons in Längsrichtung angeordnet. Kühlwagen mit maschineller Kühlung sind wegen der hohen Anschaffungskosten, der schwierigen Wartung und der Gefahr von Anlagenstörungen bei längeren Fahrten wenig verbreitet.
Bei Straßenfahrzeugen überwiegt die Trockeneiskühlung. Allerdings steigt der Anteil der maschinellen Kühlung mittels Kaltdampf-Kompressionskältemaschinen, die als Einbau-, Anbau- oder Unterflurgeräte ausgeführt werden.

Der Verdichter wird durch den Fahrzeugmotor oder einen gesonderten Verbrennungsmotor angetrieben. Zusätzlich ist noch ein Elektromotor für stationären Anschluß vorhanden.

2.7.6. Wärmepumpen für Heizzwecke

Da Wärmepumpen (vgl. 2.7.1.) es gestatten, Wärme auf ein höheres Temperaturniveau zu heben, können sie auch so ausgelegt werden, daß der Erwärmungseffekt zur Heizung herangezogen wird. Die technische Lösung gleicht im Prinzip einer Kältemaschine, lediglich der gewünschte Effekt ist bei beiden Anlagen verschieden. Die Wärmepumpe zeichnet sich dadurch aus, daß die bereitgestellte Wärmemenge ein mehrfaches des Wärmeäquivalents von ≈ 3 600 kJ/kWh beträgt, das durch die Arbeit im Verdichter aufzuwenden ist.
In der Chemieindustrie wird die Wärmepumpe zum Verdampfen und Eindampfen von Flüssigkeiten unter Nutzung sonst nicht brauchbarer Abwärme angewendet. Es laufen Versuche, die energiewirtschaftlich günstigen Effekte der Wärmepumpe auch für die Raumheizung zu nutzen. Gute Ergebnisse wurden z. B. bei der Beheizung von Sport- und Schwimmhallen erzielt.

3. Metallurgie

Die Metallurgie umfaßt alle technischen Prozesse zur Gewinnung metallischer Werkstoffe, wie Eisen, Stahl, Aluminium, Kupfer, Blei, Zink, Zinn und die Edelmetalle, sowie ihre Weiterverarbeitung zu Formgußstücken oder Halbzeugen.
Metallische Werkstoffe sind in allen Zweigen der Volkswirtschaft, insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau, Fahrzeugbau, Verkehrswesen, in der Elektroindustrie und im Bauwesen, die Grundlage der geschaffenen Gebrauchsgüter. Zur Gewährleistung der für die unterschiedlichen Verwendungszwecke notwendigen Eigenschaften werden die metallischen Werkstoffe nach einer Vielzahl unterschiedlicher Verfahren erzeugt, bei denen es sich immer um Hochtemperaturprozesse handelt, die mit hohem Energieaufwand in Form von Brennstoffen oder Elektroenergie verbunden sind.
Die Roheisen- und Stahlerzeugung befaßt sich mit der Gewinnung von *Roheisen* im Hochofen und seiner Weiterverarbeitung zu *Stahl* in verschiedenen Stahlerzeugungsaggregaten durch Behandlung mit oxydierenden Gasen sowie dem anschließenden Vergießen zu Blöcken und Strängen (vgl. 3.2.).
Die Nichteisenmetallurgie wird durch eine Vielzahl von pyro- und hydrometallurgischen Prozessen charakterisiert, die notwendig sind, um die verschiedenen Metalle, wie Aluminium, Kupfer, Blei, Zink usw., zu erzeugen. Unter den *pyrometallurgischen Prozessen* faßt man das Rösten und Sintern von Erzen sowie das Schmelzen und die Raffinationsverfahren zur Anreicherung der Metalle zusammen. Unter den *hydro-* oder *naßmetallurgischen Prozessen* werden das Aufschließen und Laugen, das Ausfällen und die Elektrolyse verstanden (vgl. 3.3.).
Als *Pulvermetallurgie* bezeichnen wir den Zweig der Metallurgie, der sich mit der Herstellung und Weiterverarbeitung von Pulvern aus Metallen, Metalloxiden und der Mischung mit Nichtmetallen befaßt. Die Pulvermetallurgie erlaubt die Herstellung von Formteilen beliebiger Art, die weitgehend in ihrer endgültigen Gestalt aus Metallpulver erzeugt werden. Die Pulver werden in Formen, die den herzustellenden Gegenständen entsprechen, unter hohem Druck gepreßt und die so entstandenen Preßlinge in einer Schutzgasatmosphäre bei Temperaturen unterhalb des Metallschmelzpunkts gesintert (vgl. 3.4.).
Die Weiterverarbeitung eines Teils der geschmolzenen Metalle zu Formgußstücken, bei der diese bereits weitgehend ihre Endform erreichen, erfolgt in den *Gießprozessen*. Hierbei werden entweder keramische Formen verwendet, die nach dem Erkalten des Metalls zerstört werden, oder Dauerformen aus Metall, die mehrfach benutzt werden können (vgl. 3.5.).
Die Weiterverarbeitung des Teils der Metalle, der zu Blöcken und Strängen gegossen wurde, erfolgt in mechanischen *Umformprozessen* durch Warm- und Kaltwalzen, Schmieden und Ziehen. Dabei werden auf einer großen Anzahl verschieden gestalteter Walzstraßen und Schmiedeeinrichtungen Profile, Rohre, Bleche, Bänder und Drähte hergestellt (vgl. 3. 6.).

3.1. Metallische Werkstoffe

3.1.1. Allgemeines

Metallische Werkstoffe bestehen meist aus mehreren Komponenten, die homogene oder heterogene Mischungen oder Verbindungen, d. h. Legierungen, bilden. So ist Messing eine Legierung aus Kupfer und Zink, Bronze eine aus Kupfer und Zinn, Stahl eine aus Eisen, Kohlenstoff und weiteren, meist metallischen Legierungselementen, wie Chrom, Nickel, Mangan usw. Legierungen bestehen aus mindestens 2 Komponenten, in vielen Fällen jedoch aus 3 und mehr Bestandteilen. Je nach Mischungsverhältnis der Einzelkomponenten und Behandlung lassen sich unterschiedliche Eigenschaften erzielen. Eine bedeutende Rolle in der breiten Werkstoffpalette nehmen dabei Metalle ein, die nicht mit anderen Metallen legiert werden, sondern in mehr oder weniger reiner (elementarer) Form verwendet werden. Beispielsweise eignet sich zur Leitung des elektrischen Stroms am besten Kupfer mit sehr geringen Verunreinigungen, für hygienische Aufbewahrung und Zubereitung von Nahrungsmitteln Reinstalumi-

nium, für die Halbleiterfertigung Reinstsilizium. Manchmal genügen sog. „Spuren" von zusätzlichen Elementen im Basismetall, um besondere Eigenschaften zu erzielen, z. B. mikrolegierter Stahl mit erhöhter Festigkeit und Zähigkeit, o. a. Eigenschaften merklich zu verschlechtern. Ausgehend von der Wahl der chemischen Zusammensetzung und der anschließenden Behandlung ist es heute möglich, für nahezu jede Beanspruchung einen geeigneten metallischen Werkstoff bereitzustellen. Darüber hinaus ergeben sich zusätzliche Einsatzmöglichkeiten durch Kombination von Metallen und Legierungen mit nichtmetallischen, organischen und anorganischen Werkstoffen. Bekannte Beispiele sind kunststoffbeschichtete Bänder, Stahlrohre mit PVC-Auskleidung für die chemische Industrie, emaillierte Gebrauchsgegenstände, asphaltierte Stahlrohre für Erdverlegung, Metalle mit eingelagerten nichtmetallischen Fasern. Der Einsatz der metallischen Werkstoffe erfolgt oft unter härtesten Bedingungen. Die Hauptbeanspruchungen, die bis zum Ausfall der Werkstücke und Bauteile führen können, sind:

– Bruch infolge zu hoher mechanischer Belastung (statisch oder dynamisch, oft kombiniert mit zusätzlichen Beanspruchungen, wie Reibung und/oder Korrosion),
– Verschleiß, z. B. durch Reibung,
– Korrosion infolge Einwirkung der Atmosphäre, von Wasser, durch Angriff chemischer Substanzen. Dabei wirken Einflußgrößen, wie hohe oder tiefe Temperaturen, Zug, Druck, Schlag, rasch wechselnde Belastungen, Reibung, Angriff von Säuren und Laugen, ionisierende Strahlung usw. Die Werkstoffe müssen oft mehreren dieser Anforderungen gleichzeitig widerstehen und dabei oft erstaunliche Leistungen vollbringen.

Spezielle Werkzeugstähle müssen bei Temperaturen bis zur Dunkelrotglut standfest sein, Bohrerkronen sich durch härteste Gesteinsschichten fressen, ohne vorzeitig zu verschleißen, Stahlbehälter in der chemischen Industrie bei hohem Druck dem Angriff kochender Säuren widerstehen, Bauteile unter arktischen oder Raumfahrtbedingungen schlagartigen Beanspruchungen standhalten, unter denen üblicher Baustahl wie Glas brechen würde. Metallische Werkstoffe kommen in der Natur selten rein (gediegen) vor. Sie sind in der Erdrinde in unterschiedlichen Anteilen sehr oft in Form von Oxiden, Sulfiden, Chloriden u. a. Verbindungen enthalten. Mit Hilfe metallurgischer Verfahren werden die zahlreichen Metalle in mehr oder weniger reiner Form dargestellt. Das Legieren erfolgt in der Regel im schmelzflüssigen Zustand. Anschließend kann mit Hilfe spanloser Formgebungsverfahren, so z. B. Gießen, Walzen, Schmieden, Pressen (vgl. 3.5., 3.6., 8.1., 8.2.), durch spanende Bearbeitung, z. B. Drehen, Fräsen, Hobeln (vgl. 8.3.), durch Fügen, z. B. Schweißen, Löten, Nieten (vgl. 8.4.), bzw. die

Kombination mehrerer Bearbeitungsprinzipien die Herstellung von Werkstücken, z. B. Zahnräder, Gehäuse, Achsen, oder Bauteilen, z. B. Brückenträger, vorgenommen werden. Häufig wird zwischen Knet- und Gußwerkstoffen unterschieden.

Knetwerkstoffe werden im festen Zustand bei Raum- oder erhöhten Temperaturen meist durch Druckeinwirkung mittels Walzen, Schmieden, Pressen usw. in die gewünschte Form gebracht.

Gußwerkstoffe werden im schmelzflüssigen Zustand in eine entsprechende Form gegossen.

Grobeinteilung metallischer Werkstoffe

Eisenwerkstoffe – Stähle, Eisen-Gußwerkstoffe
Nichteisenwerkstoffe – Schwermetalle, Leichtmetalle, Edelmetalle und sonstige Metalle

Zusammenhang zwischen Werkstoffherstellung und Eigenschaften. Die stets am Anfang der Werkstoffbearbeitung stehenden spanlosen Formgebungsverfahren führen zu stark unterschiedlichen Gefügezuständen, die die Werkstoffeigenschaften sehr beeinflussen.

Gußzustand. Die Erstarrung des flüssigen Metalls beginnt zunächst direkt an der Formenwand (kälteste Stelle) und setzt sich entgegengesetzt zur Richtung der Wärmeabfuhr nach innen fort. Es bildet sich schon von der äußeren Form her ein sehr inhomogenes Gefüge aus (Abb. 3.1.1-1). In der Schmelze sind meist feine, unaufgeschmolzene Teilchen (sog. „Keime") enthalten,

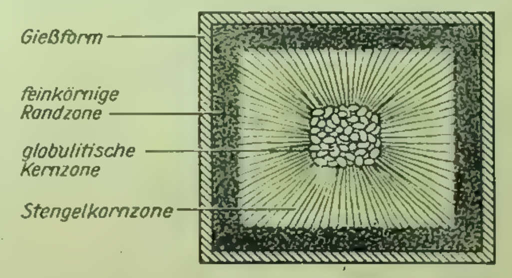


Abb. 3.1.1-1 Ausbildung eines Gußgefüges (Schema)

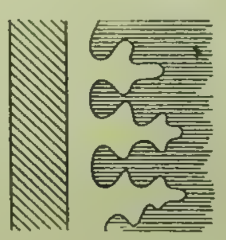


Abb. 3.1.1-2 Wachstum von dentrischen Kristallen in der Schmelze

an denen die Kristallisation zuerst einsetzt. Die angekeimten Kristalle wachsen tannenbaumartig nach innen (etwa wie Eisblumen am Fenster), bis sie zusammenstoßen (Abb. 3.1.1-2). Bei der schrittweisen Anlagerung von Teilchen aus der Schmelze an die „Äste" des „Kristallisationsbaums" werden die reinen metallischen Bestandteile der Schmelze bevorzugt. Viele der Verunreinigungen reichern sich in der Schmelze zwischen den bereits erstarrten „Ästen" an. Diese höher verunreinigten Anteile erstarren zuletzt. Dies ist der Grund für die inhomogene Verteilung von Verunreinigungen und auch Legierungselementen im Mikrobereich des erstarrten Gußstücks (sog. „Mikroseigerungen"). Darüber hinaus existieren z. B. infolge der unterschiedlichen Dichten der einzelnen Legierungskomponenten meist noch wesentlich gröbere Inhomogenitäten im erstarrten Metall („Makroseigerungen"). Die ungleichmäßige Verteilung der Verunreinigungen und einiger Legierungselemente im Gußzustand und dessen oft grobe und ungleichmäßige Gefügeausbildung ergeben Werkstoffzustände, die besonders gegenüber erhöhten Beanspruchungen nicht immer zäh genug sind (Sprödbruchgefahr). Die Anwendbarkeit des Gießens als meist sehr rationelles Formgebungsverfahren ist dadurch oft eingeschränkt. Dies ist einer der Gründe dafür, warum der Anteil der gegossenen metallischen Werkstoffe gegenüber den „gekneteten" (meist mit anschließender Zerspanung) unter 15% liegt, obwohl es oft wirtschaftlicher wäre, vom geschmolzenen Zustand über Gießen direkt zur endgültigen Form zu kommen und damit ganze Prozeßstufen einzusparen (siehe nachstehendes Schema).

Werkstückherstellung:
a) mit Verformung

Schmelzen → Gußblock → Verformung → Teilen → Zerspanen → fertiges Werkstück

b) durch Gießen

Schmelzen → Gußstück → geringe Nacharbeit → fertiges Gußstück

Stark verbesserte Gießtechnologien, verbunden mit einer günstigen Werkstoffauswahl, ergeben heute in einigen Fällen für höchste Beanspruchungen brauchbare gegossene Werkstücke (z. B. gegossene Kurbelwellen für PKW).
Beim *Umformen in der Hitze*, z. B. Walzen, Schmieden, Pressen (vgl. 8.2.), wird das oft sehr uneinheitliche, meist grobe Gußgefüge feiner und einheitlicher, die Inhomogenitäten lassen sich verringern, der Werkstoff wird insgesamt zäher. Das Gefüge wird durch die Umformung in der Hitze, die sog. *Warmformgebung*, und durch die oft vor- und nachgeschalteten Aufheiz- und Abkühlvorgänge mehrfach umkristallisiert und gleichzeitig verbessert. In vielen Fällen schließt sich an die Warmformgebung eine *Kaltformgebung* an (besonders bei der Erzeugung dünner Querschnitte, wie Bänder und Drähte). Dabei wird das Gefüge langgestreckt (Abb. 3.1.1-3) und verfestigt, die Zähigkeit ist entsprechend niedrig. Um wieder einen gut verarbeitbaren Zustand zu erhalten, muß ein weiterer Glühvorgang folgen, der eine erneute Umkristallisierung und Entfestigung bewirkt.

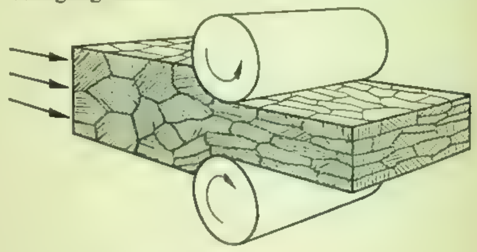


Abb. 3.1.1-3 Gefügestreckung beim Kaltwalzen

Veredlung metallischer Werkstoffe. Durch gezielte Wärmebehandlungen, z. B. geeignete Kombinationen zwischen Aufheizung, Glühtemperatur, Glühzeit und Abkühlgeschwindigkeit, lassen sich bei vielen Werkstoffen die erforderlichen Gebrauchseigenschaften in weiten Grenzen einstellen (z. B. Härten von Stahl). Durch Aufbringen geeigneter Oberflächenschichten auf den Grundwerkstoff erhält das Werkstück oft stark verbesserte Eigenschaften (z. B. Korrosions-, Zunderbeständigkeit, dekoratives Aussehen). Der Grundwerkstoff kann Überzüge aus Metallen (z. B. Zink auf Eisen), aus anorganischen Stoffen (z. B. Emaille) oder organischen Stoffen (z. B. Plaste, Farbanstriche) erhalten.
Durch Diffusion geeigneter Atome (z. B. Chromatome beim Inchromieren, Stickstoffatome beim Nitrieren, Kohlenstoffatome beim Aufkohlen) in die Oberfläche des Werkstücks entstehen meist dünne Schichten z. B. mit erhöhter Härte, erhöhtem Verschleißwiderstand oder erhöhter Korrosionsbeständigkeit (Abb. 3.1.1-4).
Der Weg der Werkstückherstellung über Metallpulver – Pressen (Verdichten) – Erhitzen (Sin-

Zone mit eindiffundiertem Zusatzelement
Grundwerkstoff

***Abb. 3.1.1-4** Grundwerkstoff mit eindiffundiertem Zusatzelement im oberflächennahen Bereich*

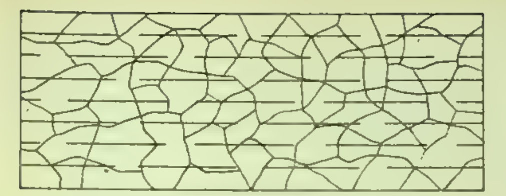


Abb. 3.1.1-5 Verbundwerkstoff mit diskontinuierlichen Fasern

tern) führt zu sog. *Sinterwerkstoffen*, mit denen sich ebenfalls ganz spezielle Werkstoffeigenschaften erzielen lassen.

Verbundwerkstoffe bestehen meist aus einer Grundmasse (z. B. Aluminium) mit eingelagerten Drähten oder Fasern eines wesentlich festeren Werkstoffs (z. B. Stahl) (Abb. 3.1.1-5). Damit ergeben sich oft überraschende und technisch interessante neue Gebrauchseigenschaften.

3.1.2. Eisenwerkstoffe

Stahl. Als Stahl bezeichnet man jede schmiedbare Eisenlegierung. Die Vielzahl von Stahlsorten unterscheiden sich durch ihre chemische Zusammensetzung und ihre Gebrauchseigenschaften.

Stähle werden eingeteilt:

– nach den Gebrauchseigenschaften in *Massenstähle* (keine besondere Reinheit gefordert) und *Qualitäts-* bzw. *Edelstähle* (erhöhter Reinheitsgrad, erhöhte Gebrauchseigenschaften, teurer),

– nach dem Erzeugungsverfahren z. B. in *Siemens-Martin(SM)-*, *Elektro(E)-*, *Thomas(T)-*, *Sauerstoffaufblas(0_2)-Stahl* (vgl. 3.2.2.),

– nach der Ausführungsart z. B. in *Band-*, *Rohr-*, *Profilstahl*,

– nach den kennzeichnenden Legierungszusätzen z. B. in *Chrom-*, *Manganstahl*,

– nach der Höhe der Legierungselemente in *unlegierten*, *niedriglegierten*, *legierten*, *hochlegierten Stahl*.

Stahlgruppen. Die Stähle lassen sich je nach Verwendungszweck oder Eigenschaften in Gruppen einteilen. Nachfolgend werden einige wichtige Gruppen erläutert.

Allgemeine Baustähle sind unlegierte Stähle, die nach ihrer Festigkeit benannt und eingesetzt werden und vorwiegend für geschraubte, genietete und geschweißte Konstruktionen Verwendung finden.

Automatenstähle sind für spangebende Bearbeitung auf Automaten besonders geeignet. Die erwünschten kurzen Späne entstehen durch Zugabe von Schwefel, Phosphor oder Blei zum Stahl.

Einsatzstähle sind unlegierte und legierte Stähle, bei denen die Randschicht aufgekohlt (eventuell gleichzeitig aufgestickt) und anschließend gehärtet wird. Dadurch entsteht eine harte Oberfläche mit gutem Verschleißwiderstand und verbesserter Dauerfestigkeit.

Federstähle sind legierte Stähle mit durch Vergütung besonders gutem Federungsvermögen für die Herstellung von Federn aller Art.

Hitze- und zunderbeständige Stähle sind hochlegierte Stähle, die bei über 600 °C durch Bildung festhaftender, dichter, oxidischer Schutzschichten eine erhöhte Zunderbeständigkeit gegenüber Luft, Heizgasen u. a. chemischen Stoffen aufweisen.

Kaltzähe Stähle sind bei tiefen Betriebstemperaturen noch ausreichend zäh und werden für Bauteile eingesetzt, die bei −40 bis −200 °C beansprucht werden.

Nitrierstähle enthalten Legierungsstoffe, die bei Nitrierbehandlung durch Bildung harter Oberflächenschichten einen erhöhten Verschleißwiderstand der Oberfläche und höhere Dauerfestigkeit aufweisen.

Rost- und säurebeständige Stähle sind hochlegierte Stähle mit Chromgehalten von mindestens 12 %, die gegenüber Säuren, Laugen und Salzlösungen weitgehend beständig sind.

Schnellarbeitsstähle sind hochlegierte Werkzeugstähle mit hohem Verschleißwiderstand und besonderer Eignung für spanabhebende Werkzeuge, die mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und unter hoher Wärmebeanspruchung (bis zur Dunkelrotglut) arbeiten.

Turbinenschaufelstähle sind niedrig-, mittel- und hochlegierte Baustähle für Turbinenschaufeln, die gute Warmfestigkeit (maximale Betriebstemperatur bis 600 °C) und ausreichende Korrosionsbeständigkeit aufweisen müssen.

Ventilstähle sind Stähle, die für Ein- und Auslaßventile in Verbrennungskraftmaschinen verwendet werden und ausreichend warm-, verschleiß-, zunderfest und beständig gegen Auspuffkondensate und Bleiverbindungen sein müssen.

Vergütungsstähle sind unlegierte und legierte Baustähle, die durch Härten und nachfolgendes Anlassen eine dem Verwendungszweck angepaßte Festigkeit bei guter Zähigkeit erhalten.

Verschleißfeste Stähle sind Stähle mit besonders gutem Verschleißwiderstand, der in der Regel durch Zugabe geeigneter Legierungselemente und entsprechende Wärmebehandlung erzielt wird.

Wälzlagerstähle sind Stähle, die im gehärteten Zustand die in Wälzlagern (Kugel-, Rollen-, Nadellagern) auftretenden hohen örtlichen Beanspruchungen aufnehmen und an die deshalb besondere Anforderungen hinsichtlich Reinheit, Homogenität, Bearbeitbarkeit, Härtbarkeit und Maßbeständigkeit gestellt werden.

Warmfeste Stähle weisen infolge der Zugabe geeigneter Legierungselemente und entsprechender Wärmebehandlung eine hohe Warmfestigkeit

und Zunderbeständigkeit auf und können deshalb bei Betriebstemperaturen zwischen 400 und 600 °C eingesetzt werden.
Warmarbeitsstähle sind Stähle für die Herstellung von Werkzeugen, die vorwiegend zur Umformung erwärmter Werkstoffe über 300 °C dienen und deren Arbeitsflächen starker Erwärmung, häufigem Temperaturwechsel und starken Verschleißbeanspruchungen unterliegen.
Werkzeugstähle dienen zur Herstellung von Werkzeugen, die zur spanlosen oder spanabhebenden Formgebung und zum Trennen oder Zerkleinern von Werkstoffen im kalten Zustand verwendet werden.
Eisen-Gußwerkstoffe. Die Einteilung dieser Werkstoffgruppe zeigt Tab. 3.1.2-1.

Tab. 3.1.2-1 *Einteilung der Eisen-Gußwerkstoffe*

Typ	Bezeichnung	Kurzzeichen
Gußeisen	Gußeisen mit Lamellengraphit	GGL
	Gußeisen mit Kugelgraphit	GGG
	legiertes Gußeisen	—
	Hartguß	GH
Temperguß	weißer Temperguß	GTW
	schwarzer Temperguß	GTS
	perlitischer Temperguß	GTP
Stahlguß		GS

Gußeisen mit Lamellengraphit ist ein Gußwerkstoff, dessen als Graphit vorliegender Kohlenstoff überwiegend lamellar ist (blatt-, rippenförmig) und dem keine Legierungselemente zugesetzt werden (Abb. 3.1.2-2).
Gußeisen mit Kugelgraphit ist ein Gußwerkstoff, dessen als Graphit vorliegender Kohlenstoffanteil nahezu vollständig in weitgehend kugeliger Form vorliegt (Abb. 3.1.2-3) und der bei erhöhter Festigkeit eine gegenüber Gußeisen mit Lamellengraphit wesentlich höhere Zähigkeit aufweist.
Legiertes Gußeisen. Der als Graphit vorliegende Kohlenstoff ist entweder überwiegend lamellar oder überwiegend kugelig. Zur Erzielung besonderer Eigenschaften werden Legierungselemente, wie Chrom, Nickel, Kupfer, Molybdän, zugesetzt.

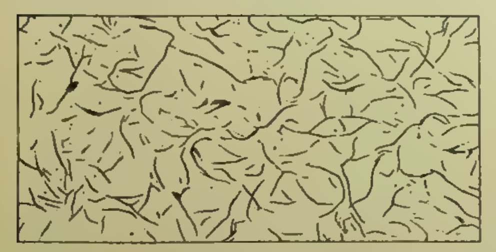


Abb. 3.1.2-2 *Gußeisen mit Lamellengraphit*

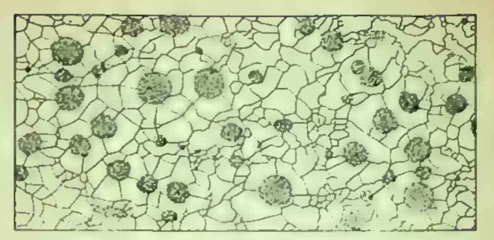


Abb. 3.1.2-3 *Gußeisen mit Kugelgraphit*

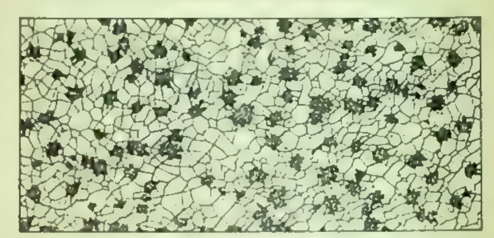


Abb. 3.1.2-4 *Geglühter Temperguß*

Hartguß ist unlegiertes oder legiertes Gußeisen, dessen Kohlenstoff in Form von Karbid und nicht als Graphit vorliegt. Das wird durch ausreichend schnelles Abkühlen des flüssigen Werkstoffs erzielt, der dadurch eine relativ hohe Härte und gutes Verschleißverhalten erhält.
Temperguß ist ein Eisen-Gußwerkstoff, dessen Zusammensetzung im Gegensatz zum Gußeisen (*Grauguß*) zunächst eine weiße (graphitfreie) Erstarrung ergibt (*Temperrohguß*). Durch anschließende Glühbehandlung bildet sich Graphit in Form balliger Temperkohle (Abb. 3.1.2-4). Je nach Glühbedingungen bleibt der Graphit erhalten (*schwarzer Temperguß*) oder wird von der Oberfläche ausgehend zunehmend entfernt. Es entsteht dann eine weiße Randzone (*weißer Temperguß*). Temperguß weist gegenüber Gußeisen mit Lamellengraphit wesentlich höhere Zähigkeit und geringere Schlagempfindlichkeit auf. Seine Herstellung ist allerdings aufwendiger.
Stahlguß. Hierzu zählen Massenstähle mit bis zu 2 % C, deren Formgebung durch Gießen in Formen aus Sand, Schamotte o. a. feuerfesten Stoffen, seltener in Dauerformen aus Metall oder Graphit, erfolgt. Stahlguß hat nach Wärmebehandlung nahezu gleichwertige Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften wie warmverformte Stähle ähnlicher Zusammensetzung. Der Einsatz bringt dort Vorteile, wo Warm- und Kaltbearbeitung schwierig sind, komplizierte, durch spanende Bearbeitung schwierig herstellbare Formen gefordert werden oder eine Herstellung von Teilen durch Gießen billiger ist.

3.1.3. Nichteisenwerkstoffe

Verwendung von Nichteisenmetallen (Überblick). Wesentliche Möglichkeiten sind die Verwendung als

– reines Metall, z. B. Kupfer für Starkstromleitungen, Reinaluminium für Trinkwasserbehälter,
– Legierung, d. h. unter Anwesenheit zusätzlicher Elemente, die eine gezielte Realisierung bestimmter Gebrauchseigenschaften bewirken, z. B. Kupfer mit Zink = Messing oder Kupfer mit Zinn = Bronze. Der Anteil der Legierungselemente kann dabei von sog. „Spuren", z. B. 10^{-2}%, bis zu größeren Anteilen, z. B. 50%, gehen.
– Überzugsmetall zur Oberflächenveredlung (Korrosionsschutz) eines anderen Grundmetalls, z. B. Zink auf Leitungsmasten, Zinn auf dünnem Stahlband (Weißblech für Konservendosen).

Nachstehend werden einige wesentliche Anwendungsgebiete wichtiger Nichteisenmetalle alphabetisch geordnet genannt.

Aluminium (Al). Die Aluminium-Weltproduktion liegt mit schätzungsweise 7 Mio t in der Größenordnung der Kupferproduktion. Das erzeugte Metallvolumen übertrifft das aller anderen NE-Metalle zusammengenommen. Aluminium zeichnet sich durch sehr gute Korrosionsbeständigkeit (steigt mit erhöhtem Reinheitsgrad) und durch geringe Dichte (um die Hälfte leichter als Stahl) aus. Die Festigkeit kann durch geeignete Zusätze und Wärmebehandlung in die Größenordnung eines höherfesten Stahls gebracht werden (600 MPa). Reinaluminium wird u. a. verwendet für Behälter, Apparate, Transportgefäße in der chemischen, Nahrungs- und Genußmittelindustrie, für Küchengeschirr und Metallwaren, für Leitungsmaterial und Kabelmäntel in der Elektrotechnik, im Bauwesen für Dächer, Regenrinnen, Fallrohre und im Verpackungswesen in Form von Folien, Tuben, Dosen usw. Reinstaluminium wird bei besonders hohen Anforderungen an Oberflächengüte und Korrosionsfestigkeit eingesetzt. Aluminiumlegierungen mit Zusätzen von Kupfer, Silizium, Magnesium, Zink, Mangan und zahlreichen anderen kleineren Zusätzen werden als Guß- und Knetwerkstoffe in einer Vielzahl von Anwendungsfällen eingesetzt.

Antimon (Sb) wird als reines Metall kaum verwendet. Große Bedeutung hat es als Legierungsmetall z. B. für Hartblei (Akkumulatorenplatten, Kabelummantelungen, Schriftmetalle), für Lagermetalle auf Blei- und Zinnbasis, für Weichlote.

Beryllium (Be). Berylliummetall wird als Werkstoff für Röntgenfenster, zum größten Teil aber zur Herstellung von Berylliumbronzen verwendet.

Blei (Pb) zeichnet sich durch eine relativ hohe Beständigkeit gegenüber atmosphärischer Korrosion, Angriffen von Leitungs- und Meerwasser, von Huminsäuren und bestimmten chemischen Substanzen aus. Es wird deshalb in der Kabelindustrie (Erdkabel, Meereskabel), für Wasserleitungen und im chemischen Apparatebau (z. B. Behälter, Rohrleitungen für Schwefelsäure) eingesetzt. Neben massiven Bleierzeugnissen werden auch verbleite Stahlelemente verwendet. Bleilegierungen werden eingesetzt im Akkumulatorenbau, für Lager (z. B. Weißmetall) und in der polygrafischen Industrie (z. B. als Schriftmetall).

Chrom (Cr). Chrommetall ist relativ spröde und schwierig herstellbar und wird nur in sehr geringem Umfang verwendet. Große Bedeutung hat Chrom als Oberflächenschutz. Es steigert die Widerstandsfähigkeit der Werkstücke gegenüber chemischem Angriff (z. B. Salpetersäure), atmosphärischer Korrosion (z. B. Rosten von Stahl und Oxydation bei erhöhten Temperaturen) und überträgt diese Eigenschaften auch auf seine Legierungen. Chromüberzüge werden elektrolytisch abgeschieden. Darüber hinaus lassen sich oberflächennahe Schichten durch Diffusion mit Chrom anreichern. Zum Legieren von Stahl verwendet man Ferrochrom.

Edelmetalle. Die wichtigsten Edelmetalle Silber (Ag), Gold (Au) und Platin (Pt) dienen seit jeher der Herstellung von Schmuck, Münzen und wertvollen Gebrauchsgegenständen. In der Technik werden sie in zwar geringen Mengen, oft aber mit sehr wichtiger Funktion eingesetzt. Silber wird in der chemischen Industrie (Apparatebau), in der Fotochemie (Herstellung von Fotoemulsionen), in der Dentaltechnik (Silber-Zinn, Silber-Palladium), in der Elektrotechnik als Kontaktwerkstoff und als Hartlot zum Löten von Schwermetallen, Stahl und Hartmetallen verwendet. Gold wird in der Technik nur begrenzt eingesetzt (Kontaktmaterial, Dentaltechnik); Hauptanwendungsgebiet ist die Schmuckindustrie.

Platin hat eine vielseitige technische Bedeutung, z. B. in der chemischen Industrie als Katalysator (Ammoniakherstellung), in der keramischen Industrie (Schmelztiegel für Spezialglas, Spinndüsen für Glasfäden), in der Elektrotechnik (Kontaktmaterial), als Thermoelementen- und Heizleiterdraht (Platin-Rhodium-Legierungen) und in der Schmuckwarenindustrie.

Kadmium (Cd). Kadmiummetall wird vorwiegend für galvanische Kadmiumüberzüge (≈ 60% der Kadmium-Weltproduktion) eingesetzt. Rund 25% werden für Legierungszwecke verwendet. Bekannte Legierungen mit Kadmiumanteil sind: Woodsches Metall (Schmelzpunkt 60 °C), Lagerlegierungen, Kupfer mit 1% Cd, das um 50% fester als reines Kupfer ist und bei elektrischen Leitungen dadurch wesentlich weniger Stützen erfordert.

Kobalt (Co). Kobaltmetall wird als Isotop (Kobalt 60), für die Medizintechnik (Kobalt-Kanone) und für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (vgl. 13.3.2.) eingesetzt. Als Bestandteil hochwarmfester Legierungen (zusammen mit Chrom und Nickel) ergibt Kobalt Werkstoffe, die

bis 975 °C noch eine ausreichende Festigkeit aufweisen. Weitere wesentliche Einsatzgebiete sind Dauermagnetlegierungen, Hartlegierungen (bis 65% Co), gesinterte Hartmetalle (5 bis 30% Co) und Kobaltstähle (2,5 bis 5% Co).

Kupfer (Cu) nimmt in der Welterzeugung von NE-Metallen mengenmäßig den 1. Platz ein. Kupfermetall wird infolge seiner hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit für Drähte, Schienen, Kabel, Bänder und Seile für die Fortleitung von Elektroenergie verwendet.

Von wesentlicher Bedeutung sind folgende Legierungstypen: *Messing* (56 bis 97% Cu, 3 bis 40% Zn, eventuell bis 3,8% Pb), *Sondermessing* (> 58% Cu, Zn u. a. Zusätze, wie Aluminium, Nickel, Mangan usw.), *Zinnbronze* (Kupfer mit max. 9% Sn), *Neusilber* (Kupfer-Nickel-Zink), *Kupfer-Nickel-Legierungen*, *Aluminiumbronzen* (Kupfer mit 4 bis 11% Al), *Berylliumbronze* (Kupfer mit 1,6 bis 2,3% Be und weiteren Zusätzen), *Kupfer-Chrom* (≈ 1% Cr).

Magnesium (Mg). Reinmagnesium wird als Guß- und Knetwerkstoff (im Gegensatz zum Reinaluminium) infolge seiner geringeren Korrosionsbeständigkeit kaum verwendet. Es wird eingesetzt für thermochemische Reaktionen (Reduktion von Metallverbindungen), als Raffinationsmittel für Metallschmelzen und als katodischer Korrosionsschutz (vgl. 8.8.2.). Magnesiumlegierungen (Guß- und Knetlegierungen auf der Basis Magnesium-Aluminium-Zink und Magnesium-Zer bzw. Magnesium-Thorium mit Zirkonzusätzen) werden für Konstruktionsteile im Leichtbau eingesetzt. Darüber hinaus dient Magnesium als Legierungszusatz für zahlreiche andere Metalle.

Mangan (Mn). Manganmetall wird infolge seiner Sprödigkeit nicht verwendet. Es ist in Form von Mangan-Eisen-Legierungen das wichtigste Zusatzmetall der Eisen- und Stahlerzeugung. Nahezu alle Stähle enthalten Mangan, das Sauerstoff und Schwefel abbindet und damit die Warmverarbeitung der Stähle ermöglicht. Auch als Zusatz zu NE-Legierungen (Kupfer-, Nickel-, Aluminium-, Magnesiumlegierungen) hat Mangan Bedeutung.

Molybdän (Mo). Molybdänmetall hat hohe Warmfestigkeit, gute elektrische und thermische Leitfähigkeit und hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Substanzen. Es wird deshalb in der chemischen und elektrotechnischen Industrie eingesetzt. Der größte Anteil an Molybdän wird zur Herstellung molybdänlegierter Stähle und von Molybdänlegierungen eingesetzt.

Nickel (Ni) wird in der Galvanotechnik (Vernickeln), zur Herstellung von Teilen in Elektronenröhren und Glühlampen und zur Herstellung von Nickellegierungen und hochlegierten Stählen verwendet. Die gebräuchlichen Nickellegierungen mit meist mehr als 60 bis 70% Ni weisen oft eine hohe Korrosionsbeständigkeit, gute Zunderbeständigkeit und Warmfestigkeit auf. Weitere Anwendungen sind weich- und hartmagnetische Nickel-Eisen-Legierungen, Ausdehnungs- und Einschmelzlegierungen, Neusilber (Kupfer-Nikkel-Zink-Legierung, z. B. für Bestecke und Münzen).

Niob (Nb) wird vorzugsweise als Ferrolegierung zur Herstellung höherfester Baustähle und als Legierungskomponente warmfester Stähle und Legierungen im Gasturbinen- und Düsenmotorenbau verwendet. Besondere Bedeutung hat Niob auch für den Reaktorbau und als Niobcarbid-(NbC)-Zusatz in Sinterhartmetallen.

Quecksilber (Hg). Reines Quecksilbermetall wird für elektrische Schalter und Kontakte, Quecksilberdampflampen, -gleichrichter, physikalisch-chemische Geräte (z. B. Thermometer, Barometer), Quecksilberdampfstrahlpumpen, im Kraftwerksbau und in der Metallurgie für die Gold- und Silbergewinnung (vgl. 3.3.3.) verwendet. Quecksilberlegierungen werden Amalgame genannt und sind meist flüssig oder teigig. Sie werden in der Zahntechnik, als Lötwerkstoffe, Reduktionsmittel und Katalysatoren verwendet.

Tantal (Ta) hat eine außergewöhnlich gute chemische Widerstandsfähigkeit (z. B. gegenüber allen Mineralsäuren, außer Flußsäure) und eine hohe Festigkeit. Es wird deshalb in größerem Umfang in der chemischen Industrie (Wärmeübertrager), für Spinndüsen, als Gittermaterial in der Elektronik, Konstruktionsmaterial für den Kondensatorbau, Werkstoff für chirurgische Instrumente und Legierungszusatz für Stähle eingesetzt.

Titan (Ti) zeichnet sich durch hohe Festigkeit bei geringer Masse (gegenüber Stahl ≈ 40% Masseeinsparung) und gute Korrosionsbeständigkeit aus. Hauptanwendungsgebiete sind deshalb der Flugzeugbau und die chemische Industrie. Titanlegierungen (z. B. mit Aluminium, Vanadin, Chrom, Mangan) ergeben Festigkeitswerte in der Größenordnung der hochfesten Stähle.

Vanadin (V) wird als reines Metall kaum verwendet, hat dagegen als Legierungsmetall und Desoxydationsmittel für die Stahlherstellung große Bedeutung (Zugabe zum flüssigen Stahl als Ferrovanadin).

Wismut (Bi). Als Reinmetall wird Wismut kaum eingesetzt. Als Legierungsmetall findet es Anwendung in Legierungen mit niedrigem Schmelzpunkt (bis zu 47 °C). Diese werden eingesetzt z. B. für elektrische Schmelzsicherungen, Feuerschutzanlagen oder Spezialote zum Löten von Glas und temperaturempfindlichen Teilen.

Wolfram (W). Wolframmetall mit seinem hohen Schmelzpunkt, geringem Dampfdruck, seiner außerordentlich hohen Festigkeit und dem bemerkenswert hohen Elastizitätsmodul hat zahlreiche Anwendungsgebiete (z. B. Glühlampen-

fabrikation, für Elektronenröhren, für Kontakte, als Schweißelektroden). Der Hauptanteil des Wolframs wird jedoch in Form von Ferrowolfram für die Stahlherstellung eingesetzt. Wolfram verleiht den Stählen besondere Eigenschaften, wie erhöhte Verschleißfestigkeit usw. Wolfram ist außerdem in eisenarmen, hochwarmfesten und zunderbeständigen Legierungen für Gasturbinen und Düsentriebwerke enthalten.

Zink (Zn). Die Zink-Weltproduktion liegt hinter Kupfer und Aluminium an 3. Stelle der NE-Metallerzeugung (≈ 3 Mio t/Jahr). Zinkmetall zeichnet sich durch gute Beständigkeit gegenüber der Einwirkung der Atmosphäre (durch Bildung dichter Schutzschichten) und gute Verformbarkeit aus. In Form von Bändern und Blechen wird Zink hauptsächlich in der Bauklempnerei (Dachrinnen, Regenrohre, Abdeckungen, Einfassungen) eingesetzt. Zinkplatten werden im Offsetdruck und in der Chemigrafie (vgl. 17.2.2., 17.1.5.) verwendet. Als Überzugsmetall für Eisen und Stahl (Korrosionsschutz) hat Zink ebenfalls große Bedeutung. Schließlich wird es für die Herstellung von Zinklegierungen eingesetzt, die anschließend gegossen oder durch Verformung weiterverarbeitet werden.

Zinn (Sn). Zinnmetall (Reinzinn) wird zu ≈ 50 % als Überzugsmetall für Stahl, Grauguß, Kupfer u. a. Metalle eingesetzt. Es ergibt hygienisch einwandfreie und korrosionsbeständige Überzüge (z. B. Weißblechdosen für Konserven). Darüber hinaus wird es u. a. für Tuben, Rohre von Getränkeleitungen und Folien verwendet (Verpackung von Lebensmitteln). Zinnlegierungen werden vorwiegend für Lote und Lagermetalle verwendet. Bekannt sind auch Zinngeräte (Krüge, Kannen), die zwecks Festigkeitssteigerung mit Antimon, Kupfer und Blei legiert werden.

Zirkon (Zr). Reines Zirkon weist günstiges Korrosionsverhalten gegenüber chemischen Angriffen auf. Es findet wegen seiner Strahlungsfestigkeit im Reaktorbau Verwendung. Als Legierungszusatz wird es für Aluminium-, Magnesium- und Kupferwerkstoffe zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften eingesetzt. Auch bei Sonderstählen werden durch Zirkonzusätze Verbesserungen erzielt.

3.2. Eisenmetallurgie

3.2.1. Roheisengewinnung

Als Roheisen bezeichnet man eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit > 2 % Kohlenstoff- sowie Silizium-, Mangan-, Phosphor- und Schwefelgehalten unterschiedlicher Höhe. Roheisen wird heute ausschließlich im Hochofen erzeugt und nach unterschiedlichen Verfahren in Stahl umgewandelt. Nur 10 % des Roheisens werden zusammen mit Schrott zur Erzeugung von Gußeisen verwendet. Die Erzeugung von Stahl unter Umgehung des Hochofens (Roheisen) durch die Reduktion der Erze im festen Zustand (Direktreduktion) und die Weiterverarbeitung in elektrisch beheizten Öfen macht heute nur 1,5 % der Weltstahlerzeugung aus, nimmt aber laufend an Bedeutung zu.

Rohstoffe und ihre Verarbeitung. Zur Erzeugung von Roheisen sind eisenhaltige Rohstoffe (vor allem Eisenerzkonzentrate, z. T. noch unaufbereitete Eisenerze sowie in geringem Umfang Eisenschrott), manganhaltige Rohstoffe (Manganerze oder Konzentrate) sowie Zuschläge (Schlackenbildner, wie Kalkstein [$CaCO_3$] oder Quarzit) erforderlich.

Eisenerze. Die Eisen- und Manganerze werden bergbaulich gewonnen und vorwiegend zu Konzentraten aufbereitet (vgl. 1.6.4.). Die wichtigsten Eisenerzmineralien sind Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit (Fe_2O_3). Daneben haben auch Brauneisenerze ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) und Siderit ($FeCO_3$) noch Bedeutung. Die unaufbereiteten, grobstückigen Eisenerze müssen vor dem Einsatz in den Hochofen zerkleinert werden, um die für den Reduktionsprozeß optimale Größe zu haben (dichte Erze sollen 25 bis 40 mm und locker aufgebaute Erze 60 bis 70 mm Korngröße haben). Die beim Zerkleinern (Brechen) abgesiebten und beim Anreichern (vgl. 1.6.3.) anfallenden Feinerze müssen stückig gemacht werden, da der Hochofen sonst verstopfen und ein zu großer Staubaustrag eintreten würde. Das Stückigmachen erfolgt unter Zusatz von Koksgrus und Wasser auf sog. Sinterbändern oder aber unter Zusatz von Bindemitteln und Wasser auf Pelletiertellern zu sog. Pellets. Die Siderite werden meistens vor dem Einsatz geröstet (von CO_2 befreit).

Koks. Als Brennstoff und Reduktionsmittel sowie zur Gewährleistung einer guten Gasdurchlässigkeit des Einsatzgutes wird *Steinkohlenkoks* verwendet. Dieser wird aus gut backender Steinkohle in Kokereien durch Erhitzen auf 950 bis 1000 °C unter Luftabschluß gewonnen. Er muß eine Stückgröße von mehr als 60 mm und eine ausreichende Festigkeit aufweisen.

Zuschläge. Die Gangart der Erze und die Asche des Kokses müssen beim Schmelzprozeß in eine flüssige reaktionsfähige Schlacke, bei der der Anteil an $CaO > SiO_2$ ist, überführt werden. Da die überwiegende Masse der Erze saueren Charakter hat, wird zur Schlackenbildung meist Kalkstein, im anderen Falle auch Quarzit zugesetzt. Das Zusammenstellen der für die gewünschte Roheisenzusammensetzung und eine reaktionsfähige Schlacke notwendigen Mengen an Erzen und Zuschlägen nennt man „Möllern“ und das Gemisch „*Möller*“. Koks gehört nicht zum Möller.

Hochofenprozeß. Zu einem Hochofenwerk gehören neben dem Hochofen (Tafel 12) selbst bis zu 4 Winderhitzer, die Gichtgasreinigung, das Gebläse zur Erzeugung des Kaltwindes, Bunkeranlagen für Möller und Koks und Lagerplätze zur Vorratshaltung von Erzen, Zuschlägen und Koks (Abb. 3.2.1-1). Der Hochofen besteht aus einem *Bodenstein*, einem darauf ruhenden zylindrischen Teil, dem *Gestell*, darüber der umgekehrt kegelförmigen *Rast*, dem zylindrischen *Kohlensack* und dem ebenfalls kegelförmigen *Schacht* sowie ganz oben der zylindrischen *Gicht*. Den äußeren Mantel des Hochofens bildet ein geschweißter Stahlblechpanzer, der mit feuerfestem Material ausgekleidet ist. Für den Schacht und den Kohlensack verwendet man hochwertige Schamottesteine und für die Rast und das Gestell Kohlenstoffsteine. Außerdem muß das Ofenmauerwerk durch den Einbau von wasserdurchflossenen Kühlkästen intensiv gekühlt werden, um einen Dauerbetrieb von mehreren Jahren zu gewährleisten. Im Hinblick auf die Bauweise unterscheidet man zwischen Hochöfen mit und ohne Gerüst. Bei ersterem Typ ist der Schacht von einem Gerüst umgeben, das alle Einrichtungen zur Begichtung, Zuführung des Heißwinds, Abgasabführung, Zwischenbühnen und Treppen trägt. Hochöfen ohne Gerüst besitzen einen mit einem Stahlblechmantel gepanzerten Schacht, der alle oben genannten Einrichtungen trägt. Der Schacht kann auf einem Tragring und Säulen ruhen oder in tragring- und säulenfreier Bauweise errichtet werden. Erz, Koks und Zuschläge werden aus den Bunkern zur Gicht mit Hilfe von Beschickungskübeln oder aber mit Förderbändern zur *Gicht* (*-bühne*, oberer Ofenabschluß) gehoben und durch die Begichtungsanlage in den Ofen geschüttet. Die Abdichtung des Ofens gegen die Atmosphäre

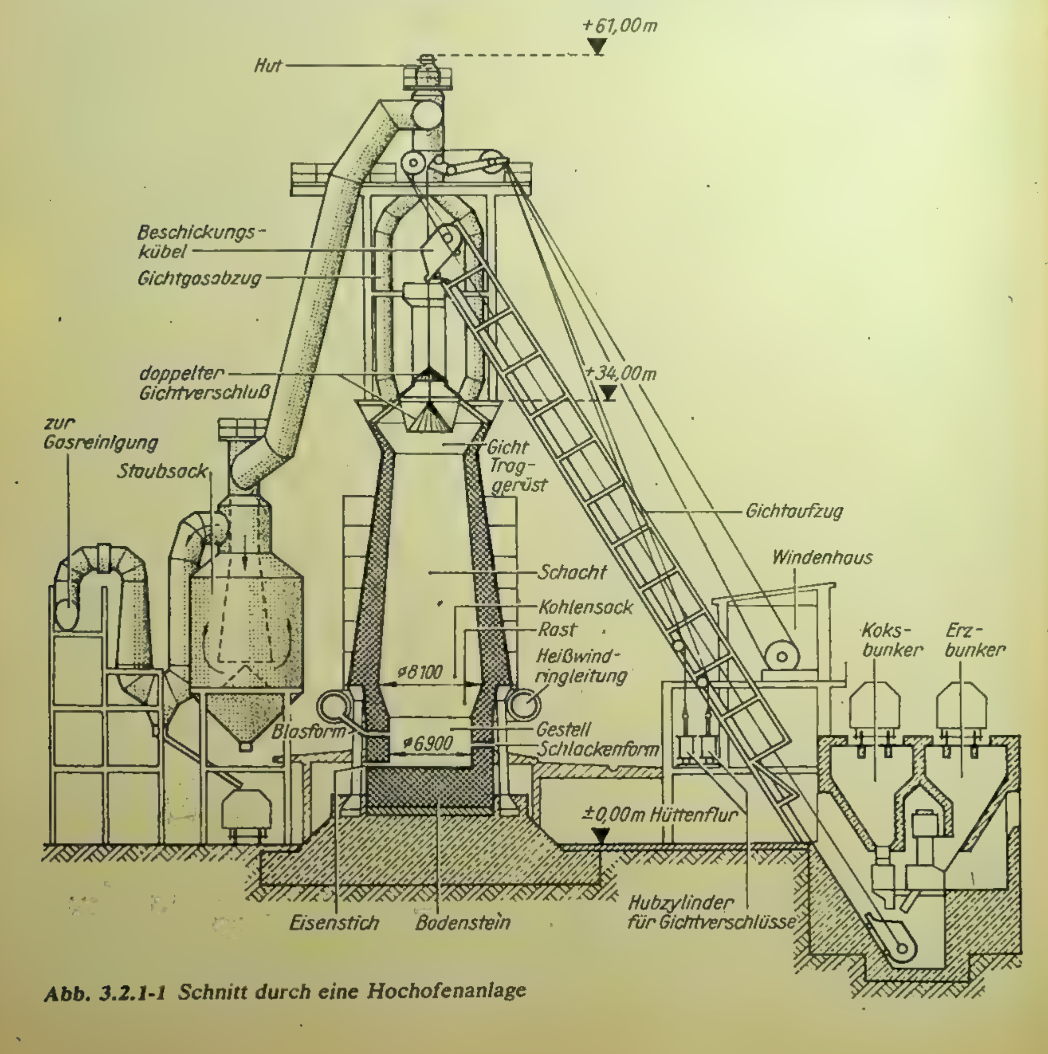


Abb. 3.2.1-1 *Schnitt durch eine Hochofenanlage*

übernimmt der aus 2 bis 3 Glocken bestehende Gichtverschluß, wobei wechselweise nur 1 Glocke geöffnet wird. Durch laufende, häufig schon automatische Begichtung wird der Ofen stets bis oben gefüllt gehalten.

Die *Winderhitzer*, nach dem Erfinder auch *Cowper* genannt, sind Stahlblechzylinder mit feuerfester Auskleidung, die im Innern ein *Gitterwerk* aus feuerfesten Steinen und einen unterschiedlich gestalteten *Verbrennungsschacht* enthalten. Im Verbrennungsschacht wird Gichtgas mit Luft verbrannt und durch die heißen Gase das Gitterwerk erhitzt. Ist die gewünschte Temperatur erreicht, wird die Zufuhr von Gichtgas und Verbrennungsluft gestoppt, der Kamin geschlossen und Kaltwind durch das Gitterwerk gedrückt. Dabei erhitzt er sich auf 900 bis 1 350 °C und gelangt in die Heißwindleitung, die den Hochofen in der Mitte der Rast als Ringrohr umschließt. Davon führen Rohrleitungen zu den bis zu 36 wassergekühlten *Windformen*, durch die der Heißwind ständig in den Ofen geblasen wird. Die bei der Verbrennung des Kokses im Ofen entstehenden heißen Gase geben bei ihrem Aufsteigen im Schacht einen Teil ihrer Wärme an die Beschickung ab und entweichen als Gichtgas durch die Gichtgasleitung. In der Gasreinigung wird dieses von mitgerissenen feinen Beschickungsteilchen befreit. Durch Erhöhung des Gichtgasdrucks auf 1,5 bis $2{,}5 \cdot 10^5$ Pa lassen sich der Ofendurchsatz steigern und der Koksbedarf sowie der Aufwand für die Gasreinigung vermindern.

Die aus der Gangart und den Zuschlägen entstehende Schlacke läuft durch den Schlackenstich in der Mitte des Gestells ab. Das Eisen sticht man periodisch an unmittelbar über dem Bodenstein angeordneten Abstichöffnungen ab (Großhochöfen weisen bis zu 4 Abstichöffnungen auf).

Metallurgische Vorgänge im Hochofen. Der durch die Windformen einströmende Heißwind trifft auf den glühenden Koks und verbrennt ihn (Oxydation des Kohlenstoffs $C + O_2 \rightarrow CO_2$). Da sich vor den Windformen die heißeste Stelle des Hochofens befindet, reduziert hier glühender Kohlenstoff unmittelbar die bis dorthin gelangten noch nicht reduzierten Eisenoxide (direkte Reduktion $FeO + C \rightarrow Fe + CO$). Außerdem reagiert der Kohlenstoff des vor den Düsen angehäuften glühenden Kokses mit dem zunächst gebildeten Kohlendioxid nach dem *Boudouardschen Gleichgewicht* ($C + CO_2 \rightleftharpoons 2\,CO$), das oberhalb von 1 150 °C praktisch quantitativ von links nach rechts verläuft, bei niedriger Temperatur aber wieder rückläufig wird (Rußabscheidung im Schacht). Das aufsteigende Monoxid (CO) reduziert im oberen Teil der Rast und in den heißen Zonen des Schachts die Eisen- und einen Teil der Manganoxide (indirekte Eisenreduktion $3\,Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2\,Fe_3O_4 + CO_2$; $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3\,FeO + CO_2$; $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$). Der Reaktionsverlauf setzt einen Überschuß an CO voraus. Dieser bildet sich auch je nach der vorliegenden Temperatur nach dem Boudouardschen Gleichgewicht mit glühendem Kohlenstoff aus Kohlendioxid zurück, steht also zur weiteren indirekten Reduktion der Eisenoxide im Schacht zur Verfügung, die bis zu 750 °C herab stattfinden. Der nicht zu CO_2 umgesetzte Anteil ist der wichtigste brennbare Bestandteil des Gichtgases. Die als Oxide im Erz vorliegenden Eisenbegleiter werden in der Nähe der Windformen direkt reduziert und dabei ganz oder teilweise vom Eisen aufgenommen (Mangan zu 40 bis 70 %, Silizium teilweise und Phosphor vollständig). Außerdem

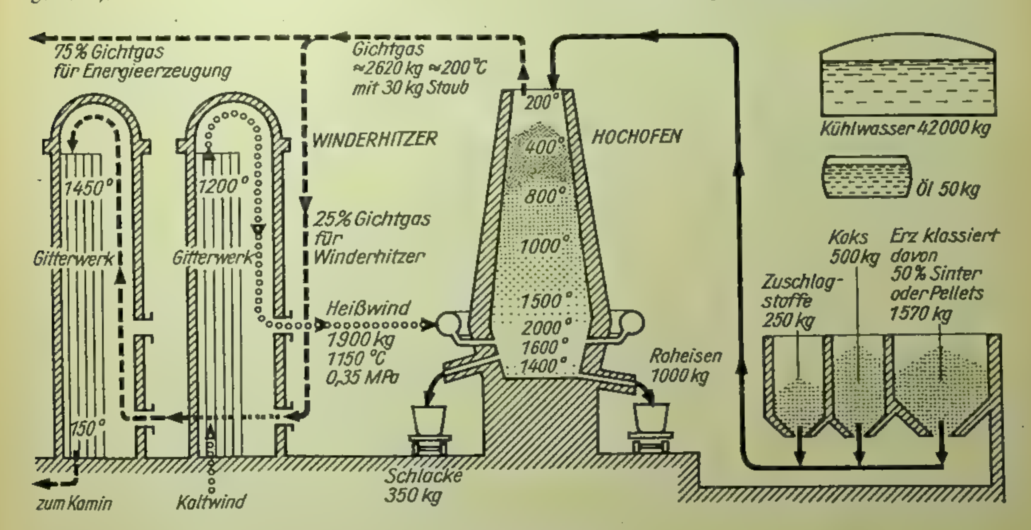


Abb. 3.2.1-2 Stoffbilanz eines modernen Hochofens

löst das sich bildende flüssige Eisen bei der Berührung mit dem Koks noch ≈ 3 bis 4% Kohlenstoff ($3\,Fe + C \rightarrow Fe_3C$).

Der *Durchsatz* eines Hochofens ist vor allem vom Eisengehalt und der Zusammensetzung der Erze sowie von der Güte des Kokses abhängig. Anhaltswerte je 1000 kg Roheisenerzeugung zeigt Abb. 3.2.1.-2. Während der vergangenen 30 Jahre ist der Verbrauch von Koks pro Tonne Roheisen von 1000 kg auf ≈ 450 kg plus 50 bis 60 kg Heizöl bzw. entsprechende Mengen Erdgas oder Kohlenstaub zurückgegangen. Die „Zusatzbrennstoffe" Heizöl, Erdgas oder Kohlenstaub werden in die Windformen eingeblasen. Außerdem kann der Wind noch mit Sauerstoff angereichert werden. Ein Hochofen von 810 m^3 Nutzinhalt und 6,7 m Gestelldurchmesser (Eisenhüttenstadt) liefert etwa 800 bis 1000 t Roheisen/24 h. Großhochöfen von 3000 m^3 Nutzinhalt und 12 m Gestelldurchmesser liefern bereits 6000 t/24 h und einer der größten Hochöfen der Welt in Kriwoi Rog (UdSSR) mit 5000 m^3 Nutzinhalt und 14 m Gestelldurchmesser erzeugt 11000 t/24 h.

Erzeugnisse des Hochofens. *Roheisen.* Entsprechend der Möllerzusammensetzung können die in Tab. 3.2.1-3 aufgeführten Roheisensorten produziert werden. Das abgestochene Roheisen kann sofort zu *Masseln* (Barren) vergossen oder in einem dreh- und heizbaren, großen (mehrere 100 t Fassungsvermögen) *Roheisenmischer* gespeichert werden. Dieser Mischer dient dem Ausgleich der Zusammensetzung der einzelnen Abstiche und der Entschwefelung vor der Weiterverarbeitung im Stahlwerk. Das unmittelbare Vergießen des Roheisens in Formen ist heute ohne Bedeutung, weil die Qualität zu gering ist. Deshalb wird heute Gußeisen ausschließlich durch Umschmelzen von Gießereiroheisen unter Zusatz von Gußbruch und Schrott im Kupolofen gewonnen (vgl. 3.5.1.).

Gichtgas hat als wichtigsten brennbaren Bestandteil 28 bis 32% CO und einen Heizwert von ≈ 3,8 MJ/m^3. Rohgichtgas enthält 20 bis 40 g/m^3 Staub, der in der Gichtgasreinigung (Staubsack zur Grobreinigung sowie Naß-, Trocken- und elektrische Feinreinigung) entfernt wird. Gereinigtes Gichtgas wird als Brenngas für die Winderhitzer, für die Dampferzeugung (mit angeschlossener Dampfturbine), zum Antrieb des Verdichters (Gasgebläse) verwendet.

Hochofenschlacke dient als Nebenprodukt des Hochofens zur Herstellung verschiedener Baustoffe, wie Zement, Schotter, Hüttenbims, und wird gemahlen als Düngemittel verwendet.

Niederschachtofen. Es handelt sich dabei um einen dem Hochofen ähnlichen Schachtofen geringerer Bauhöhe. Man unterscheidet entsprechend der Heizungsquelle Elektro- und Blasniederschachtöfen. Letztere verwenden wie der Hochofen Koks als Brennstoff, haben aber heute wegen ihres hohen Brennstoffverbrauchs kaum noch Bedeutung für die Roheisenerzeugung.

Elektroniederschachtöfen werden zur Erzeugung von Ferro-Silizium und -Mangan verwendet. Sie bestehen aus einer Schmelzwanne, die mit einem Deckel abgeschlossen ist, durch den die Elektroden geführt werden. Außerdem haben Elektroniederschachtöfen Füllrümpfe zur Aufgabe des Erzes der Zuschläge und der zur Reduktion notwendigen Reaktionskohle sowie Abzugsrohre für das Gichtgas. Die Elektroniederschachtöfen werden vor allem in Ländern verwendet, wo genügend Wasserkraft zur billigen Stromerzeugung zur Verfügung steht, da der Energieverbrauch 9 GJ/t Roheisen beträgt.

Direktreduktion von Eisenerzen. Unter der Direktreduktion oder der Eisenschwammerzeugung versteht man die Reduktion von Eisenerz im festen Zustand bei Temperaturen zwischen 800 und 950°C mit gasförmigen, teilweise auch festen Reduktionsmitteln bei 1050°C unter Umgehung des Hochofens. Die gasförmigen Reduktionsmittel erhält man nach dem *Purofer-Verfahren* durch eine unvollständige Verbrennung von Erdgas oder Heizöl bzw. durch Umsetzung des beim *Midland-Ross-Verfahren* im Prozeß selbst anfallenden Gichtgases mit Erdgas ($2\,CH_4 + O_2 \rightarrow 2\,CO + 4\,H_2$). Das dabei gewonnene Produkt wird als *Eisenschwamm* bezeichnet und hat meist folgende Analyse: 90 bis 95% Fe, d. h. ≈ 84 bis 88% metallisches Fe, ≈ 2% O_2, 1% C und < 5% $SiO_2 + Al_2O_3$. Der Eisenschwamm wird anschließend in Elektrolichtbogenöfen zu Stahl weiterverarbeitet und stellt

Tab. 3.2.1-3 *Chemische Zusammensetzung verschiedener Roheisensorten in %*

Bezeichnung	Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
Stahleisen (manganarm)	3,0 ··· 4,0	··· 1,0	(< 1,0)	0,08 ··· 0,12	··· 0,05
Stahleisen (manganreich)	3,0 ··· 4,0	··· 1,0	(2,0 ··· 3,0)	0,08 ··· 0,12	··· 0,05
Thomasroheisen	3,2 ··· 3,6	0,3 ··· 0,6	0,5 ··· 1,5	1,8 ··· 2,2	0,05 ··· 0,15
Bessemerroheisen	3,8	1,0 ··· 2,5	1,0 ··· 3,0	0,07 ··· 0,1	··· 0,04
Gießereiroheisen	3,5 ··· 4,2	2,0 ··· 3,0	··· 1,0	0,5 ··· 1,0	··· 0,07
Hämatitroheisen	3,5 ··· 4,2	2,0 ··· 3,5	0,7 ··· 1,5	0,08 ··· 0,12	··· 0,04
Spiegeleisen	4,5 ··· 5,5	0,5 ··· 2,5	6,0 ··· 15,0	< 0,1	≲ 0,04
Hochofen-Ferromangan	6,0 ··· 8,0	< 1,5	30,0 ··· 80,0	0,2 ··· 0,3	0,02
Hochofen-Ferrosilizium	1,2 ··· 1,6	9,0 ··· 15,0	0,5 ··· 0,7	0,12 ··· 0,16	0,02 ··· 0,04

im Vergleich zum Schrott ein sehr sauberes Ausgangsmaterial dar. Für die Direktreduktion werden als Ausgangsmaterial Stückerz oder Pellets mit > 70% Fe verwendet, da niedrigere Eisengehalte die Weiterverarbeitung wegen des hohen Schlackenanfalls praktisch unmöglich machen. Die am weitesten verbreiteten Verfahren sind die Schachtofenverfahren nach dem Midland-Ross- (USA) und dem Purofer-Prinzip (BRD), bei denen das Erz und das Reduktionsgas sich im Gegenstromprinzip durch den Ofen bewegen (Abb. 3.2.1-4).
Weiter haben noch das *Hyl-Verfahren* (Mexiko) als Retortenverfahren, bei dem das Reduktionsgas diskontinuierlich das in Retorten befindliche Erz reduziert, und das *Drehrohrverfahren*, bei dem mit festem Koks als Reduktionsmittel gearbeitet wird, Bedeutung.

3.2.2. Stahlerzeugung

Stahl ist eine Eisenkohlenstofflegierung, die in der Regel < 2% C enthält und ohne Vorbehandlung walz- und schmiedbar ist. Die Grenze von 2% C kann durch Legierungselemente angehoben werden.
Stahl wird aus Roheisen und Schrott in wechselnden Anteilen durch Vermindern des Kohlenstoffgehalts und der Eisenbegleiter, insbesondere des Phosphors und Schwefels, nach verschiedenen Verfahren hergestellt.
Einsatzstoffe. Allen Stahlerzeugungsverfahren ist gemeinsam, daß zur Gewinnung von Stahl Roheisen, Schrott, Ferrolegierungen und Schlackenbildner benötigt werden. Der Anteil des Roheisens am metallischen Einsatz im Weltmaßstab beträgt 55 bis 60% und der des Schrotts 40 bis 45%.
Roheisen hat je nach dem Stahlerzeugungsverfahren eine unterschiedliche Zusammensetzung (vgl. Tab. 3.2.1-3) und wird im festen oder flüssigen Zustand in die Schmelzaggregate eingebracht.

Schrott stammt entweder als „Neuschrott" aus der Metallverarbeitung, wo er beim Gießen, Walzen, Schmieden, Zerspanen, Stanzen usw. anfällt, oder „Altschrott" aus der Sammlung von unbrauchbar gewordenen Stahlerzeugnissen, wie Maschinen, Apparateteilen, Fahrzeugkarosserien, Stahlbauwerken usw. Bei der Wiederverwendung muß zwischen unlegiertem und legiertem Schrott unterschieden werden, wobei der legierte Schrott nach den Legierungselementen unterschieden werden muß.
Ferrolegierungen werden in der Regel als Eisenlegierungen dazu benötigt, die für die Erzielung bestimmter Stahleigenschaften notwendigen Legierungsgehalte im Stahl zu sichern. So finden Ferro-Silizium (45 bis 90% Si), Ferro-Mangan (≈ 65% Mn), Ferro-Chrom (≈ 75% Cr) usw. Verwendung. Diese Ferrolegierungen werden meist in Elektroöfen, seltener in Hochöfen, nach gesonderten Verfahren erzeugt.
Als *Schlackenbildner* wird gebrannter Kalk (CaO) verwendet, der möglichst > 90% CaO enthalten soll. Zur Erzeugung von reaktionsfähigen Schlacken werden außerdem Flußspat (CaF_2) mit möglichst > 70% CaF_2 oder auch Bauxit mit 50 bis 60% Al_2O_3 verwendet.
Die Blasstahlverfahren. Bei diesen Verfahren wird flüssiges Roheisen durch Behandeln mit reinem Sauerstoff (99,5% O_2), selten mit Luft, in Stahl umgewandelt. Der Sauerstoff verbindet sich dabei mit den Eisenbegleitern (Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Phosphor) zu Oxiden, die im Falle des Kohlenmonoxids (CO) als Gas entweichen oder in der Schlacke gebunden werden. Der im Roheisen vorhandene Schwefel wird nicht oxydiert (mit Ausnahme eines geringen Anteils bei den Sauerstoffaufblasverfahren), sondern in basischen Schlacken als CaS gebunden. Die bei der Oxydation frei werdende Wärme erhält das Bad flüssig, obwohl sein Schmelz-

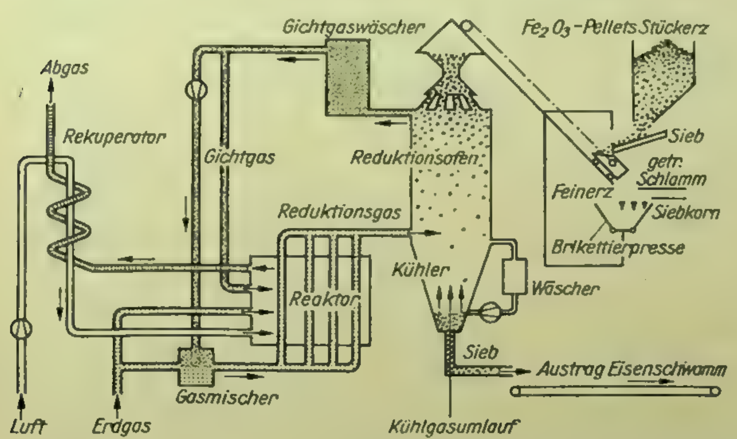


Abb. 3.2.1-4 *Schema der Direktreduktionsanlage nach dem Purofer-Prinzip*

punkt infolge Absinkens des Kohlenstoffgehalts ansteigt, und gleicht die durch den kalten Schrott, die Zuschläge und die beim Gießen auftretenden Wärmeverluste aus.

Bei den *bodenblasenden Konverterverfahren* wird in einem birnenförmigen, kippbaren Gefäß, dem *Stahlwerkkonverter*, reiner Sauerstoff vom Boden her durch das flüssige Roheisen geblasen. Ursprünglich wurde Luft (Wind) verwendet, und zwar anfangs in einem sauer ausgekleideten Konverter, dem *Bessemer-Konverter* (1854 von *H. Bessemer* eingeführt), für phosphorarmes und später in einem basisch ausgekleideten Gefäß (gesinterter Dolomit), dem *Thomas-Konverter* (1878 von *G. Thomas* eingeführt), für phosphorreiches Roheisen. Bei letzterem Verfahren fällt phosphorreiche Schlacke an, die als wertvolles Düngemittel (*Thomasmehl*) verwendet wird. Beide Verfahren sind heute praktisch bedeutungslos, da im Bessemer-Konverter kein Phosphor entfernt werden kann, also nur sehr phosphorarme Roheisensorten verwendet werden können, und der im Thomas-Konverter erzeugte Stahl hohe Stickstoffgehalte aufweist, die seine Verwendung stark einschränken (Alterung, Versprödung).

Das Durchblasen von reinem Sauerstoff wurde 1968 erstmalig zur Betriebsreife entwickelt und der bodenblasende Sauerstoffkonverter (*OBM-*, *LWS-*, *QEK-Verfahren*[1]) eingeführt. Dabei wird durch einen Düsenboden reiner Sauerstoff eingeblasen. Um den Verschleiß des Düsenbodens infolge der beim Verbrennen der Eisenbegleiter mit reinem Sauerstoff auftretenden Temperatur von > 1950 °C in wirtschaftlichen Grenzen zu halten, werden im Konverterboden Düsen mit einem offenen Kühlsystem angewendet, d. h. aus einem doppelwandigen Rohr strömt aus der Zentraldüse reiner Sauerstoff und aus der Manteldüse als Kühlmedium gasförmiger (Erdgas) oder flüssiger Kohlenwasserstoff (Heizöl). Die Kohlenwasserstoffe werden beim Austritt aus der Düse zersetzt und erniedrigen durch den dafür notwendigen Wärmebedarf die Temperatur.

Die Konverter sind basisch (mit Dolomit oder Magnesit) zugestellt und erreichen Schmelzmassen bis zu 250 t. Zum Frischen wird das vom Hochofen bzw. Roheisenmischer kommende flüssige Roheisen in den zum Füllen geneigten Konverter, in den bereits vorher 15 bis 20% Schrott und ≈ 10% Kalk (bezogen auf die Gesamteinsatzmasse) eingebracht worden sind, eingegossen (Abb. 3.2.2-1). Anschließend wird die Zufuhr des Sauerstoffs und des Kühlmediums angestellt und der Konverter aufgerichtet. Während des Blasens oxydieren die Eisenbegleiter, wobei die Reihenfolge ihrer Oxydation von ihrer Affinität zum Sauerstoff, der Temperatur und dem Zeitpunkt der Schlackenbildung abhängen. So werden bei phosphorreichem Roheisen durch den in der Schmelze atomar gelösten Sauerstoff nacheinander Silizium, Mangan und Kohlenstoff oxydiert und, sobald eine reaktionsfähige Schlacke vorliegt, auch der Phosphor. Der Kohlenstoff verbrennt zu CO und entweicht gasförmig, Silizium, Mangan und Phosphor gehen als Oxide in die Schlacke über und werden dort gebunden ($C + O \rightarrow CO$, $Si + 2\ O \rightarrow SiO_2$, $Mn + O \rightarrow MnO$ und $2\ P + 5\ O \rightarrow P_2O_5$).

Nachdem die Phosphorentfernung abgeschlossen ist, wird das Blasen beendet, der Konverter umgelegt, eventuell Legierungszusätze vorgenommen und der Stahl dann in die Gießpfanne entleert. Die Blaszeit beträgt 15 bis 20 min und die Gesamtschmelzzeit ≈ 45 min.

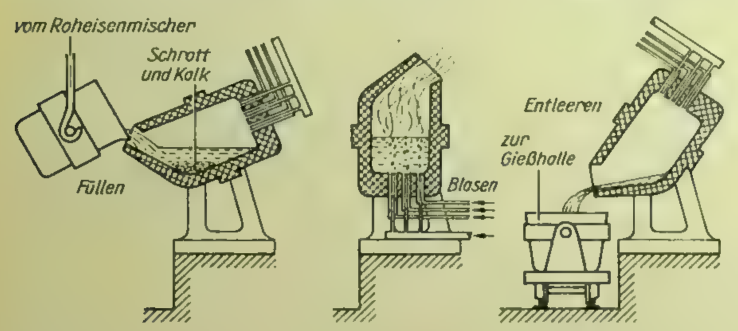


***Abb. 3.2.2-1** Arbeitsstellungen eines bodenblasenden Sauerstoffkonverters (Schema)*

Ausschließlich zur Erzeugung von rost- und säurebeständigen Stählen wurden Sonderverfahren entwickelt, bei denen eine chromreiche Schmelze in einem mit hochwertigen feuerfesten Materialien ausgekleideten Konverter mit einem Gasgemisch behandelt wird. Das Gasgemisch sichert die Oxydation des Kohlenstoffs bei gleichzeitiger Schonung des Chromgehalts der Schmelze. Beim *AOD-Verfahren*[2] wird ein Gemisch aus Argon und Sauerstoff und beim

[1] Oxygen-Boden-Maximilianshütte — Compagnie des Ateliers et Forges de la Loire und Societe Wendel-Sidelor — Qualitäts- und Edelstahlkombinat

[2] AOD-Verfahren Argon-Oxygen Decarburation

[3] Creusot-Loire (Frankreich) — Uddeholm (Schweden)

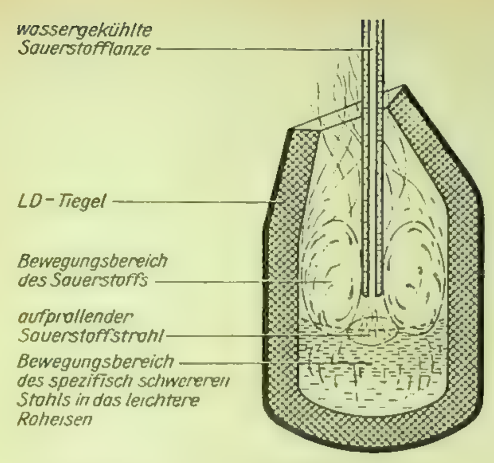


Abb. 3.2.2-2 Sauerstoffaufblaskonverter (LD-Tiegel)

CLU-Verfahren[3] ein Wasserdampf-Sauerstoff-Gasgemisch verwendet.
Bei den *Sauerstoffaufblasverfahren* wird reiner Sauerstoff mit Drücken von 6 bis $12 \cdot 10^5$ Pa auf das Roheisen aufgeblasen.
Das *LD-Verfahren*[4] wurde 1951 erstmalig angewendet und verarbeitet phosphorarmes Roheisen (Stahlroheisen, vgl. Tab. 3.2.1-3) und 15 bis 20% Schrott. Die Schmelze befindet sich in einem birnenförmigen Gefäß (Tiegel), das mit hochwertigem Dolomit oder Magnesit ausgekleidet wird und Schmelzmassen bis 450 t erreichen kann (Abb. 3.2.2-2). Das Bad gerät durch den mit hoher Geschwindigkeit aufprallenden Sauerstoffstrahl und das Absinken des entstehenden spezifisch schwereren Stahls in das leichte Roheisen in Bewegung, wodurch ein intensiver Ablauf der Oxydationsreaktionen gewährleistet ist. Während des Blasens entsteht ein so hoher Wärmeüberschuß, daß der anfangs zugesetzte Schrott geschmolzen wird. Die Blaszeit beträgt ≈ 20 min und die Gesamtschmelzzeit ≈ 45 min. Die Chargen können bei bestimmten Kohlenstoffgehalten abgefangen, d. h. der Blasprozeß abgebrochen werden, wobei sich aber gewisse Schwierigkeiten ergeben, so daß der LD-Konverter vor allem für Stahl mit niedrigen Kohlenstoffgehalten geeignet ist, der hervorragende Güteeigenschaften aufweist. Die Leistungsfähigkeit des LD-Konverters ist hoch und beträgt bei einem 330-t-Konverter ≈ 2 Mio t/Jahr.
Die Verarbeitung von phosphorreichem Eisen (Thomas-Roheisen) war jedoch erst durch die Entwicklung des *LDAC-Verfahrens* (*LD*, *ARBED*, *CNRM*[5]) möglich.

[4] Vereinigte Österreichische Stahlwerke *Linz* und Österreichische Alpine-Montan-Gesellschaft *Donawitz*
[5] Acieries *Réunies* de *Burbach-Esch-Dudlang* — *Centre National* de *Recherches Metallurgiques* (Lüttich)

Der Prozeß läuft ebenfalls in einem Sauerstoffaufblaskonverter ab, wobei aber mit dem Sauerstoff zusammen Kalkpulver auf das Bad geblasen wird, wodurch sich sehr schnell eine flüssige Schlacke bildet, die eine frühzeitige Entphosphorung bewirkt (bis auf ≈ 0,2% P bei noch 0,7% C). Darauf wird die Schlacke mit einem Phosphorpentoxidgehalt (P_2O_5) von > 20% abgezogen. Durch weiteres Blasen mit Sauerstoff und Kalk werden Phosphor und Kohlenstoff auf die gewünschten Endgehalte gesenkt. Der bei der Oxydation des Phosphors entstehende Wärmeüberschuß ermöglicht die Verarbeitung von 25 bis 30% Schrott im Einsatz. Die Blaszeit beträgt ≈ 20 bis 30 min und die Gesamtschmelzzeit ≈ 45 bis 50 min.
Ein Nachteil des LD- und LDAC-Verfahrens besteht darin, daß das bei der Oxydation des Kohlenstoffs entstehende CO ungenutzt aus dem Konverter entweicht und nur außerhalb des Schmelzprozesses nachverbrannt und zur Dampferzeugung verwendet werden kann. Die Nutzung der bei der Verbrennung des Kohlenmonoxids zu -dioxid entstehenden Wärme für den Schmelzprozeß gelang mit dem sog. *Kaldo-Verfahren* (nach dem Erfinder, *Kal*ling und dem Standort des Entwicklungsbetriebes, *Do*mnarvet, Schweden). Es wird in einem schrägliegenden Trommelkonverter durchgeführt, der mit

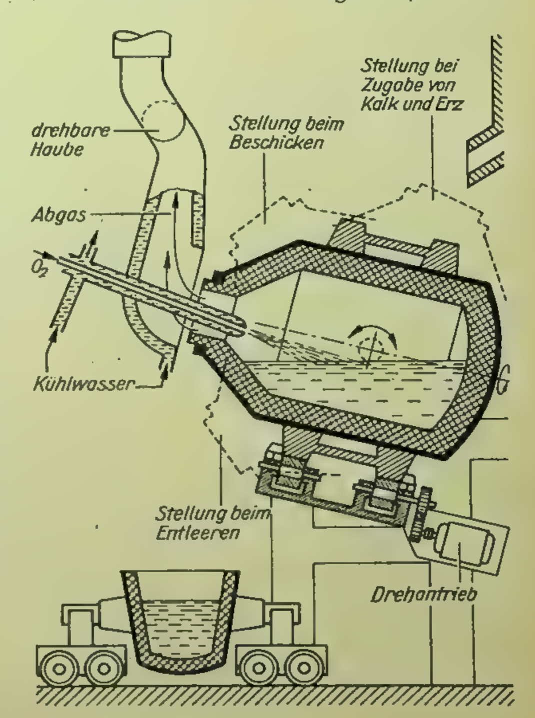


Abb. 3.2.2-3 Kaldo-Rotor

30 U/min umläuft (Abb. 3.2.2-3). Der Konverter ist basisch zugestellt und kann ein Fassungsvermögen bis 180 t besitzen. Der reine Sauerstoff wird mit einer durch die Konvertermündung führenden wassergekühlten Lanze auf das Schmelzbad mit einem Druck von 3,5 bis $4,5 \cdot 10^5$ Pa aufgeblasen und z. T. zur Oxydation der Eisenbegleiter einschließlich des Kohlenstoffs und z. T. zur Oxydation des Kohlenmonoxids zu -dioxid verbraucht. Durch die Rotation des Konverters wird die Ausmauerung desselben durch die relativ kältere Eisenschmelze gekühlt und zum andern die Überführung der Oxide des Siliziums, Mangans und Phosphors in die Schlacke erleichtert. Durch die CO-Verbrennung entsteht ein hoher Wärmeüberschuß, der den Einsatz von 40 bis 45% Schrott ermöglicht. Es wird sowohl phosphorarmes als auch -reiches Roheisen verarbeitet. Das Kaldo-Verfahren hat jedoch nicht die Verbreitung gefunden wie das LD- und das LDAC-Verfahren, da der Verschleiß der Konverterausmauerung relativ hoch ist.

Herdofenverfahren. Bei diesen Verfahren reicht die bei der Oxydation der Eisenbegleiter frei werdende Wärme nicht aus, um den meist in Anteilen von >50% zugesetzten Schrott aufzuschmelzen. Aus diesem Grunde ist eine Beheizung notwendig, die entweder durch gasförmige oder flüssige Brennstoffe oder aber Elektroenergie erfolgt.

Das *Siemens-Martin-(SM-)Verfahren* (1864 von *F. Siemens* Deutschland, und *P. Martin* Frankreich, entwickelt) ist ein Herdofenverfahren, das in seinen Einsatzverhältnissen sehr variabel ist und 20 bis 100% Schrott verarbeiten kann. Beim Vorhandensein von flüssigem Roheisen wird das sog. *Roheisen-Erz-Verfahren*, bei dem 20 bis 50% Schrott und entsprechend 80 bis 50% meist phosphorarmes flüssiges Roheisen eingesetzt wird, angewendet (vor allem in der UdSSR).

Steht nur festes Roheisen zur Verfügung, wird mit 60 bis 100% Schrott und max. 40% Roheisen gearbeitet. Zum Aufschmelzen des Einsatzes ist eine Flamme mit hoher Temperatur und Strahlungsintensität (Leuchtkraft) notwendig, da die Wärme im SM-Ofen hauptsächlich durch Strahlung auf den Einsatz übertragen wird. Die hohe Strahlungsintensität wird durch einen schwere Kohlenwasserstoffe enthaltenden Brennstoff erreicht. Als Brennstoff dienen Heizöl oder Erdgas und Heizöl. Die zum Schmelzen des Stahlschrotts notwendige hohe Temperatur (≈ 1750°C) kann nur durch Vorwärmen der Verbrennungsluft erreicht werden. Deshalb hat der SM-Ofen im sog. Unterofen Wärmespeicher (*Regenerativkammern*) mit Gitterwerken aus feuerfesten Steinen. Der Oberofen besteht aus dem von einem Gewölbe überspannten *Schmelzraum*, an dem sich rechts und links der *Ofenkopf* mit den Öl- und Gasbrennern und Luftzügen anschließt. Der Herd ist heute fast ausschließlich basisch mit Magnesit oder Dolomit ausgekleidet. Wände und Gewölbe sind mit hochwertigen Magnesitsteinen zugestellt. Die Öfen sind überwiegend feststehend und weisen Schmelzmassen zwischen 5 und 900 t auf. Kippöfen, bei denen das Ofengefäß kippbar gelagert ist, sind heute seltener und erreichen nur Einsatzmassen von 250 t. Das Beschickungsgut, wie Schrott, Roheisen, Kalk und eventuell Kalkstein, wird mit einem *Chargierkran* oder einer *Einsetzmaschine* (Tafel 12) in Mulden durch die Arbeitstüren in den Schmelzraum eingebracht und auf den Herd gekippt. Die Luft strömt durch das auf 1300°C von den Abgasen erhitzte Gitterwerk der Regenerativkammer, erwärmt sich dabei und gelangt durch die Luftzüge zum Brennerkopf, wo es sich mit dem gleichzeitig eingeblasenen Brennstoff vermischt und mit einer sehr heißen Flamme über dem Herd verbrennt. Dadurch werden das Einsatzgut zum Schmelzen gebracht und die metallurgischen Reaktionen ermöglicht. Die heißen Verbrennungsgase strömen danach durch den Zug des gegenüberliegenden Brennerkopfs in die abgekühlte Regenerativkammer und erhitzen deren Gitterwerk. Etwa alle 10 min wird die Richtung von Brennstoff und Luftstrom mit der der Verbrennungsgase gewechselt, so daß die Kammern des Unterofens wechselweise aufgeheizt werden. Während des Schmelzens werden Schrott und Roheisen durch die Flammengase und den Luftüberschuß von ≈ 10% direkt oxydiert. Zusammen mit dem Kalk bildet sich aus den Eisenoxiden und den Oxiden der Eisenbegleiter eine Schlacke, die den Sauerstoff an das Schmelzbad abgibt und bei ausreichend hoher Badtemperatur zu einer Oxydation des Kohlenstoffs führt. Das entstehende Kohlenmonoxid perlt in Form von Bläschen vom Herdboden durch die Schmelze (*Kochen*). Dadurch werden Wasserstoff und Suspensionen weitgehend aus der Schmelze herausgespült. Gleichzeitig wird eine innige Berührung des Stahlbads und der Schlacke mit der Flamme gewährleistet, was sich günstig auf den Wärmeübergang von der Flamme zum Bad und auf den Ablauf der Frischreaktionen auswirkt. Durch den Zusatz von Erz oder reinem Sauerstoff, wie das beim *Roheisen-Erz-Verfahren* mit hohen Anteilen von flüssigem Roheisen der Fall ist, kann die Entkohlung beschleunigt werden. Im Verlauf des sog. *Frischens* (Oxydation) werden Silizium, Mangan und Phosphor oxydiert und ihre Oxide gehen in die Schlacke über. Beim Vorliegen einer ausreichend basischen Schlacke kann während des Frischvorgangs auch ein Teil des Schwefels von der Schlacke aufgenommen werden. Um die Oxydation des Kohlenstoffs bei einem vorgesehenen Gehalt abzubrechen, wird Ferrosilizium oder -mangan im Ofen zugesetzt. Der während des Frischens im Stahlbad gelöste Sauerstoff, der die Verarbeitung zu verformungsfähigen Blök-

ken oder Strängen verhindern würde, wird entfernt, indem man während des Abstechens aus dem Ofen Ferrosilizium und Aluminium in die Pfanne zusetzt. Die Erzeugung von legierten Stählen im Siemens-Martin-Ofen ist nur in beschränktem Umfange möglich. Nach Erreichen der vorgesehenen Zusammensetzung und Temperatur wird die Schmelze in die Pfanne abgestochen (Tafel 12). Die Gesamtchargenzeit einer Siemens-Martin-Schmelze beträgt 5 bis 8 h, und die Leistungsfähigkeit eines solchen Ofens ist gegenüber einem LD-Konverter wesentlich geringer. Sie beträgt z. B. bei einem 200-t-Ofen ≈ 0,2 Mio t/Jahr.

Die intensive Anwendung von Sauerstoff beim Einsatz von flüssigem Roheisen und das Bestreben, das beim Frischen entstehende Kohlenmonoxid durch Verbrennung zu -dioxid für den Schmelzprozeß zu nutzen, führte zum Umbau vorhandener SM-Öfen in *Tandemöfen*. Bei diesen Öfen wird der Herd in 2 Abteilungen aufgeteilt (Abb. 3.2.2-4); während in dem einen die flüssige Schmelze mit Sauerstoff gefrischt wird, verbrennt man in der 2. Abteilung das aus der ersten herübergeleitete Kohlenmonoxid mit Sauerstoff und heizt den dort eingebrachten Schrott auf ≈ 1 150 °C vor. Die Schmelzleistung solcher Öfen liegt höher als die von Siemens-Martin-Öfen.

Das *Elektrolichtbogenverfahren* als das zweite wichtige Herdofenverfahren nimmt ständig an Bedeutung zu. Bisher wurden vor allem unlegierte, niedrig- und hochlegierte Edelstähle in diesem Schmelzaggregat erzeugt. Mit Zunahme der Schmelzmasse/Ofen bis auf ≈ 400 t werden auch in erheblichem Umfang Massenstähle im Elektrolichtbogenofen erschmolzen.

Die Konstruktion des heute noch hauptsächlich verwendeten Elektrolichtbogenofens (Tafel 13) geht auf den französischen Erfinder *P. Héroult* zurück, der sich diesen Ofentyp 1899 patentieren ließ. Hier wird die elektrische Energie eines Lichtbogens, der zwischen den Graphitelektroden und dem Schmelzgut brennt, in die für den Schmelzprozeß notwendige Wärme umgewandelt. Die Lichtbogenheizung ermöglicht einmal infolge ihrer guten Regelbarkeit eine genaue

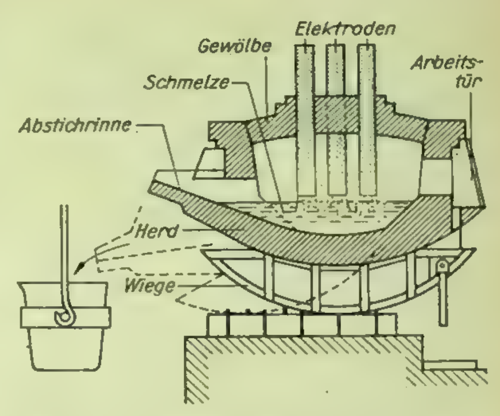


Abb. 3.2.2-5 Schema eines Elektrolichtbogenofens

Temperaturführung der Schmelze und zum anderen durch das Fehlen von Flammgasen die Einstellung von oxydierenden oder reduzierenden Schmelzbedingungen. Durch Verwendung einer reduzierenden basischen Schlacke („*Feinungschlacke*") sind gute Entschwefelungsbedingungen und eine gute Ausnutzung der Legierungsmetalle gegeben. Lichtbogenöfen arbeiten mit Drehstrom und sind mit 3 durch das Gewölbe führenden Graphitelektroden ausgerüstet (Abb. 3.2.2-5), deren Abstand vom Schmelzbad automatisch über den Elektrodenstrom oder einen Widerstand in der Strombahn geregelt wird, so daß ein ununterbrochener Lichtbogen gewährleistet ist. Die Öfen sind mit wenigen Ausnahmen basisch (mit Dolomit oder Magnesit) zugestellt. Das Gewölbe wird entweder aus Silikat- oder Chrom-Magnesit-Steinen gemauert.

Zum Beschicken wird das Gewölbe angehoben und zur Seite geschwenkt. Hinsichtlich der Technologie unterscheidet man zwischen dem *Aufbau-* und dem *Umschmelzverfahren*. Beim *Aufbauschmelzen* wird aus einem unlegierten Einsatz ein legierter Stahl „aufgebaut". Dabei wird

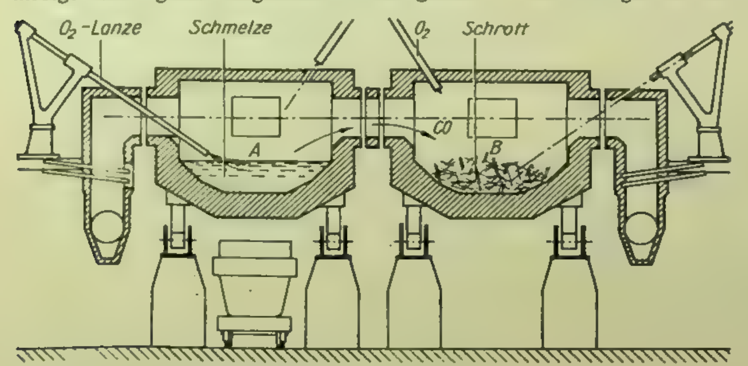


Abb. 3.2.2-4 Schnitt durch einen Tandemofen (A = Abteilung A, B = Abteilung B)

30 U/min umläuft (Abb. 3.2.2-3). Der Konverter ist basisch zugestellt und kann ein Fassungsvermögen bis 180 t besitzen. Der reine Sauerstoff wird mit einer durch die Konvertermündung führenden wassergekühlten Lanze auf das Schmelzbad mit einem Druck von 3,5 bis 4,5 · 10^5 Pa aufgeblasen und z. T. zur Oxydation der Eisenbegleiter einschließlich des Kohlenstoffs und z. T. zur Oxydation des Kohlenmonoxids zu -dioxid verbraucht. Durch die Rotation des Konverters wird die Ausmauerung desselben durch die relativ kältere Eisenschmelze gekühlt und zum andern die Überführung der Oxide des Siliziums, Mangans und Phosphors in die Schlacke erleichtert. Durch die CO-Verbrennung entsteht ein hoher Wärmeüberschuß, der den Einsatz von 40 bis 45% Schrott ermöglicht. Es wird sowohl phosphorarmes als auch -reiches Roheisen verarbeitet. Das Kaldo-Verfahren hat jedoch nicht die Verbreitung gefunden wie das LD- und das LDAC-Verfahren, da der Verschleiß der Konverterausmauerung relativ hoch ist.

Herdofenverfahren. Bei diesen Verfahren reicht die bei der Oxydation der Eisenbegleiter frei werdende Wärme nicht aus, um den meist in Anteilen von >50% zugesetzten Schrott aufzuschmelzen. Aus diesem Grunde ist eine Beheizung notwendig, die entweder durch gasförmige oder flüssige Brennstoffe oder aber Elektroenergie erfolgt.

Das *Siemens-Martin-(SM-)Verfahren* (1864 von *F. Siemens* Deutschland, und *P. Martin* Frankreich, entwickelt) ist ein Herdofenverfahren, das in seinen Einsatzverhältnissen sehr variabel ist und 20 bis 100% Schrott verarbeiten kann. Beim Vorhandensein von flüssigem Roheisen wird das sog. *Roheisen-Erz-Verfahren*, bei dem 20 bis 50% Schrott und entsprechend 80 bis 50% meist phosphorarmes flüssiges Roheisen eingesetzt wird, angewendet (vor allem in der UdSSR).

Steht nur festes Roheisen zur Verfügung, wird mit 60 bis 100% Schrott und max. 40% Roheisen gearbeitet. Zum Aufschmelzen des Einsatzes ist eine Flamme mit hoher Temperatur und Strahlungsintensität (Leuchtkraft) notwendig, da die Wärme im SM-Ofen hauptsächlich durch Strahlung auf den Einsatz übertragen wird. Die hohe Strahlungsintensität wird durch einen schwere Kohlenwasserstoffe enthaltenden Brennstoff erreicht. Als Brennstoff dienen Heizöl oder Erdgas und Heizöl. Die zum Schmelzen des Stahlschrotts notwendige hohe Temperatur (≈ 1750°C) kann nur durch Vorwärmen der Verbrennungsluft erreicht werden. Deshalb hat der SM-Ofen im sog. Unterofen Wärmespeicher (*Regenerativkammern*) mit Gitterwerken aus feuerfesten Steinen. Der Oberofen besteht aus dem von einem Gewölbe überspannten *Schmelzraum*, an dem sich rechts und links der *Ofenkopf* mit den Öl- und Gasbrennern und Luftzügen anschließt. Der Herd ist heute fast ausschließlich basisch mit Magnesit oder Dolomit ausgekleidet. Wände und Gewölbe sind mit hochwertigen Magnesitsteinen zugestellt. Die Öfen sind überwiegend feststehend und weisen Schmelzmassen zwischen 5 und 900 t auf. Kippöfen, bei denen das Ofengefäß kippbar gelagert ist, sind heute seltener und erreichen nur Einsatzmassen von 250 t. Das Beschickungsgut, wie Schrott, Roheisen, Kalk und eventuell Kalkstein, wird mit einem *Chargierkran* oder einer *Einsetzmaschine* (Tafel 12) in Mulden durch die Arbeitstüren in den Schmelzraum eingebracht und auf den Herd gekippt. Die Luft strömt durch das auf 1300°C von den Abgasen erhitzte Gitterwerk der Regenerativkammer, erwärmt sich dabei und gelangt durch die Luftzüge zum Brennerkopf, wo es sich mit dem gleichzeitig eingeblasenen Brennstoff vermischt und mit einer sehr heißen Flamme über dem Herd verbrennt. Dadurch werden das Einsatzgut zum Schmelzen gebracht und die metallurgischen Reaktionen ermöglicht. Die heißen Verbrennungsgase strömen danach durch den Zug des gegenüberliegenden Brennerkopfs in die abgekühlte Regenerativkammer und erhitzen deren Gitterwerk. Etwa alle 10 min wird die Richtung von Brennstoff und Luftstrom mit der der Verbrennungsgase gewechselt, so daß die Kammern des Unterofens wechselweise aufgeheizt werden. Während des Schmelzens werden Schrott und Roheisen durch die Flammengase und den Luftüberschuß von ≈ 10% direkt oxydiert. Zusammen mit dem Kalk bildet sich aus den Eisenoxiden und den Oxiden der Eisenbegleiter eine Schlacke, die den Sauerstoff an das Schmelzbad abgibt und bei ausreichend hoher Badtemperatur zu einer Oxydation des Kohlenstoffs führt. Das entstehende Kohlenmonoxid perlt in Form von Bläschen vom Herdboden durch die Schmelze (*Kochen*). Dadurch werden Wasserstoff und Suspensionen weitgehend aus der Schmelze herausgespült. Gleichzeitig wird eine innige Berührung des Stahlbads und der Schlacke mit der Flamme gewährleistet, was sich günstig auf den Wärmeübergang von der Flamme zum Bad und auf den Ablauf der Frischreaktionen auswirkt. Durch den Zusatz von Erz oder reinem Sauerstoff, wie das beim *Roheisen-Erz-Verfahren* mit hohen Anteilen von flüssigem Roheisen der Fall ist, kann die Entkohlung beschleunigt werden. Im Verlauf des sog. *Frischens* (Oxydation) werden Silizium, Mangan und Phosphor oxydiert und ihre Oxide gehen in die Schlacke über. Beim Vorliegen einer ausreichend basischen Schlacke kann während des Frischvorgangs auch ein Teil des Schwefels von der Schlacke aufgenommen werden. Um die Oxydation des Kohlenstoffs bei einem vorgesehenen Gehalt abzubrechen, wird Ferrosilizium oder -mangan im Ofen zugesetzt. Der während des Frischens im Stahlbad gelöste Sauerstoff, der die Verarbeitung zu verformungsfähigen Blök-

ken oder Strängen verhindern würde, wird entfernt, indem man während des Abstechens aus dem Ofen Ferrosilizium und Aluminium in die Pfanne zusetzt. Die Erzeugung von legierten Stählen im Siemens-Martin-Ofen ist nur in beschränktem Umfange möglich. Nach Erreichen der vorgesehenen Zusammensetzung und Temperatur wird die Schmelze in die Pfanne abgestochen (Tafel 12). Die Gesamtchargenzeit einer Siemens-Martin-Schmelze beträgt 5 bis 8 h, und die Leistungsfähigkeit eines solchen Ofens ist gegenüber einem LD-Konverter wesentlich geringer. Sie beträgt z. B. bei einem 200-t-Ofen ≈ 0,2 Mio t/Jahr.
Die intensive Anwendung von Sauerstoff beim Einsatz von flüssigem Roheisen und das Bestreben, das beim Frischen entstehende Kohlenmonoxid durch Verbrennung zu -dioxid für den Schmelzprozeß zu nutzen, führte zum Umbau vorhandener SM-Öfen in *Tandemöfen*. Bei diesen Öfen wird der Herd in 2 Abteilungen aufgeteilt (Abb. 3.2.2-4); während in dem einen die flüssige Schmelze mit Sauerstoff gefrischt wird, verbrennt man in der 2. Abteilung das aus der ersten herübergeleitete Kohlenmonoxid mit Sauerstoff und heizt den dort eingebrachten Schrott auf ≈ 1 150 °C vor. Die Schmelzleistung solcher Öfen liegt höher als die von Siemens-Martin-Öfen.
Das *Elektrolichtbogenverfahren* als das zweite wichtige Herdofenverfahren nimmt ständig an Bedeutung zu. Bisher wurden vor allem unlegierte, niedrig- und hochlegierte Edelstähle in diesem Schmelzaggregat erzeugt. Mit Zunahme der Schmelzmasse/Ofen bis auf ≈ 400 t werden auch in erheblichem Umfang Massenstähle im Elektrolichtbogenofen erschmolzen.
Die Konstruktion des heute noch hauptsächlich verwendeten Elektrolichtbogenofens (Tafel 13) geht auf den französischen Erfinder *P. Héroult* zurück, der sich diesen Ofentyp 1899 patentieren ließ. Hier wird die elektrische Energie eines Lichtbogens, der zwischen den Graphitelektroden und dem Schmelzgut brennt, in die für den Schmelzprozeß notwendige Wärme umgewandelt. Die Lichtbogenheizung ermöglicht einmal infolge ihrer guten Regelbarkeit eine genaue

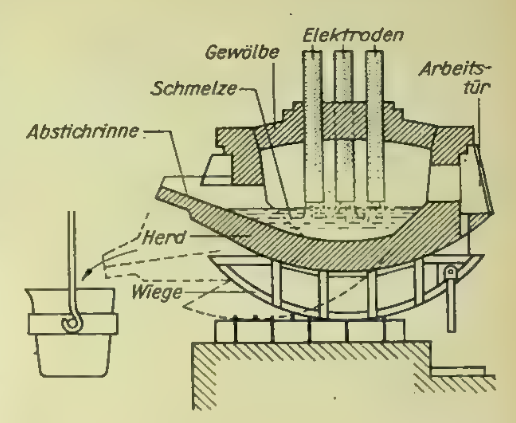


Abb. 3.2.2-5 Schema eines Elektrolichtbogenofens

Temperaturführung der Schmelze und zum anderen durch das Fehlen von Flammgasen die Einstellung von oxydierenden oder reduzierenden Schmelzbedingungen. Durch Verwendung einer reduzierenden basischen Schlacke („*Feinungsschlacke*") sind gute Entschwefelungsbedingungen und eine gute Ausnutzung der Legierungsmetalle gegeben. Lichtbogenöfen arbeiten mit Drehstrom und sind mit 3 durch das Gewölbe führenden Graphitelektroden ausgerüstet (Abb. 3.2.2-5), deren Abstand vom Schmelzbad automatisch über den Elektrodenstrom oder einen Widerstand in der Strombahn geregelt wird, so daß ein ununterbrochener Lichtbogen gewährleistet ist. Die Öfen sind mit wenigen Ausnahmen basisch (mit Dolomit oder Magnesit) zugestellt. Das Gewölbe wird entweder aus Silikat- oder Chrom-Magnesit-Steinen gemauert.
Zum Beschicken wird das Gewölbe angehoben und zur Seite geschwenkt. Hinsichtlich der Technologie unterscheidet man zwischen dem *Aufbau-* und dem *Umschmelzverfahren*. Beim *Aufbauschmelzen* wird aus einem unlegierten Einsatz ein legierter Stahl „aufgebaut". Dabei wird

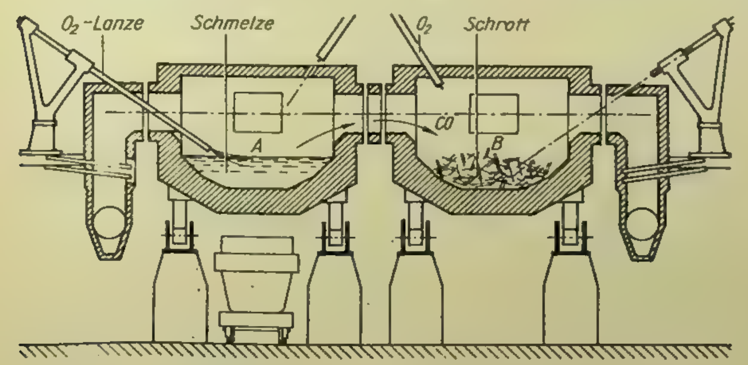


Abb. 3.2.2-4 Schnitt durch einen Tandemofen (A = Abteilung A, B = Abteilung B)

der unlegierte Einsatz unter Verwendung von gasförmigem Sauerstoff, seltener von Erz, gefrischt, wobei ein lebhaftes *Kochen* für eine gute Entgasung, Entphosphorung und Abscheidung von Suspensionen sorgt. Bei Einsatz von Sauerstoff ist die Frischperiode kurz und dauert ≈ 30 bis 60 min und wird durch das Abziehen der Frischschlacke beendet. Nach einer sog. *Vordesoxydation* mit Hilfe von Aluminium, Ferrosilizium oder Kohlenstoff wird eine aus Kalk und Flußspat bestehende „*Feinungsschlacke*" aufgegeben, die nach Verflüssigung durch Aluminium oder Ferrosilizium reduziert wird. Dieses „*Feinen*" dauert ≈ 60 bis 90 min und ermöglicht sowohl eine Senkung des Sauerstoffgehalts des Bades (Diffusionsdesoxydation) als auch eine gute Entschwefelung. Der restliche Sauerstoff wird kurz vor dem Abstich durch Zugabe von Elementen mit hoher Sauerstoffaffinität (Silizium oder Aluminium) entfernt. Legierungselemente werden je nach Sauerstoffaffinität zugesetzt, und zwar beim Einsetzen (Nickel, Kobalt, Kupfer), nach der Vordesoxydation (Kohlenstoff und Mangan), während des Feinens (Mangan, Chrom, Wolfram), nach dem Feinen (Vanadin, Niob) oder kurz vor dem Abstechen (Silizium und Aluminium) oder in der Pfanne zugegeben (Titan, Zirkon), in die der Stahl durch Kippen des Ofens nach der Desoxydation abgestochen wird.

Beim *Umschmelzverfahren* wird der Einsatz in seiner chemischen Zusammensetzung weitgehend auf die zu erschmelzende Stahlmarke abgestimmt und besteht deshalb im wesentlichen aus legiertem Schrott, wobei lediglich eine kurze „Feinungsperiode" zur Korrektur der Stahlzusammensetzung durchgeführt wird. Beim *Umschmelzen mit Frischperiode* wird ebenfalls von einem legierten Einsatz ausgegangen, aber durch Anwendung von gasförmigem Sauerstoff und der damit erreichbaren hohen Temperaturen eine Entfernung des Kohlenstoffs bei gleichzeitiger geringer Oxydation der Legierungselemente erreicht. Um die in die Schlacke übergegangenen

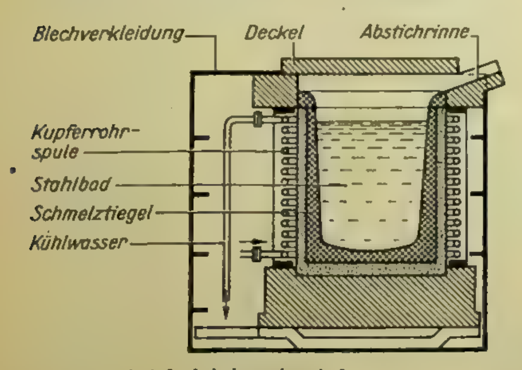


Abb. 3.2.2-6 Induktionstiegelofen

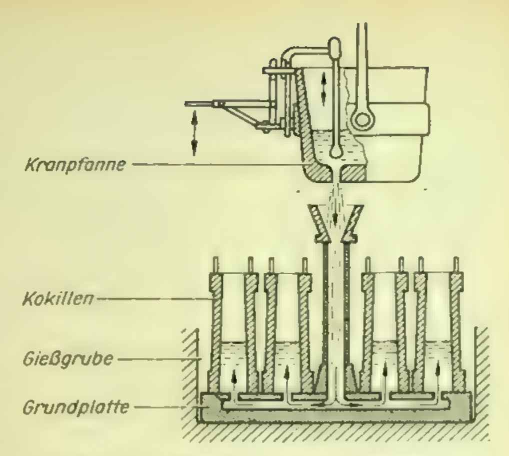


Abb. 3.2.2-7 Steigender Guß im Gespann

Legierungselemente zurückzugewinnen, wird die Frischschlacke mit Hilfe von Aluminium oder Ferrosilizium reduziert und erst dann abgezogen und der Stahl wie vorher beschrieben unter einer „Feinungsschlacke" zu Ende geschmolzen.

Induktionsöfen erhitzen das Schmelzgut in einem elektromagnetischen Wechselfeld, das bei *Netzfrequenzöfen* von der Stärke des Felds, bei *Mittelfrequenzöfen* von der Geschwindigkeit seiner Änderung abhängt. Die meist basisch ausgekleideten Schmelztiegel, die eine Masse bis zu 60 t erreichen können, sind von einer wassergekühlten Kupferrohrspule umgeben (Abb. 3.2.2-6). Die Schmelze wird durch die in ihr entstehenden Wirbelströme gut durchmischt. In Induktionsöfen werden meist nur *Umschmelzchargen* unter Einsatz von Schrott mit tiefem Phosphor- und Schwefelgehalt erzeugt.

Der in den unterschiedlichen Schmelzaggregaten erzeugte Stahl wird beim Abstich in sog. *Gießpfannen* gegossen. Sie können bis zu 400 t Stahl aufnehmen und bestehen aus einem geschweißten Blechkörper, der mit feuerfestem Material ausgemauert, gestampft oder geslingert (vgl. 3.5.3.) ist. Der Stahl fließt durch einen im Boden der Pfanne befindlichen Ausguß, der entweder durch eine Stopfenvorrichtung oder durch einen Schiebeverschluß geöffnet wird. Die Gießtemperatur liegt ≈ 70 bis 100 °C über dem Erstarrungspunkt des Stahls.

Blockguß. *Blöcke*, die durch Walzen und Schmieden weiterverarbeitet werden, sowie *Brammen* für die Blech- und Bänderherstellung werden durch diskontinuierliches Gießen in gußeiserne Kokillen erzeugt. Beim *fallenden Guß* (*Ober-* oder *Einzelguß*) fließt der Stahl von oben in die auf einer gußeisernen Platte stehende Kokille. Beim *steigenden* Guß (*Unter-* oder *Gespannguß*) werden die Kokillen von unten mit Stahl gefüllt. Er fließt durch den Gießtrichter und in der Grundplatte befindliche mit feuerfesten Steinen ausgemauerte *Kanäle* gleichzeitig in

mehrere, zu einem *Gespann* verbundene Kokillen (Abb. 3.2.2-7). Für große Schmiedestücke können die Blockmassen bis zu 300 t betragen.

Strangguß ist ein kontinuierliches Gießverfahren, bei dem der Stahl aus einer *Zwischenpfanne* in eine wassergekühlte, oben und unten offene *Kupferkokille* gegossen wird und aus ihr unten als am Rand bereits erstarrter Strang laufend austritt (Tafel 13). Nach dem völligen Erstarren und eventuellem Richten wird der Strang dann mit dem *Schneidbrenner* oder einer *Maschinenschere* auf die gewünschte Teillänge (*Knüppel*) geschnitten. Das *Ausbringen* (Ausnutzung des gegossenen Materials) liegt bei Strangguß bis zu 15% höher als beim Blockguß, außerdem werden Kosten für das Auswalzen der Blöcke auf Block- und Vorwalzwerken eingespart.

Bogen-Stranggußanlagen (Abb. 3.2.2-8) benötigen etwa nur die halbe Bauhöhe von *Senkrecht-Stranggußanlagen*. Auch bei letzteren ist es möglich, den Strang im warmen Zustand abzubiegen und ihn erst in der Waagerechten zu schneiden. In der Regel werden auf Stranggußanlagen 2 bis 8 Stränge gleichzeitig vergossen, wobei der Querschnitt der Stränge entweder quadratisch oder rechteckig sein kann. Für die Erzeugung von Blechen werden Brammen bis zu einer Breite von 2200 mm und 300 mm Dicke vergossen, die anschließend kontinuierlich zu Breitband gewalzt werden (*Breitband-Brammengießanlagen*). Wegen seiner wirtschaftlichen Vorteile nimmt der Anteil des stranggegossenen Stahls laufend zu.

Vakuumbehandlung von Stahl. Nach dem Erschmelzen in den bisher dargestellten Schmelzaggregaten kann der Stahl noch unzulässig hohe Wasserstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffgehalte aufweisen, die bei der Weiterverarbeitung zu einer Verminderung der Qualität des Stahls füh-

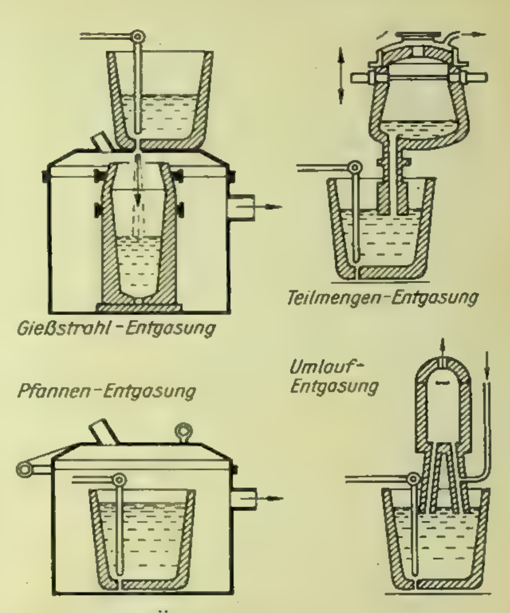


Abb. 3.2.2-9 *Übersicht über die Vakuumbehandlungsanlagen von Stahl*

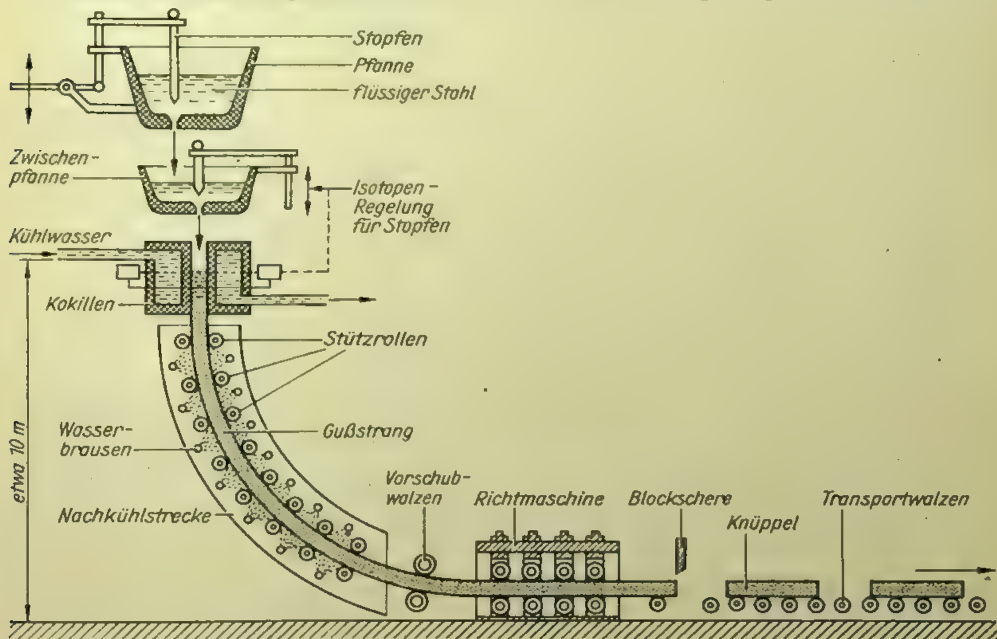


Abb. 3.2.2-8 **Bogen-Stranggußanlage**

ren. Für hochbeanspruchte Schmiedestücke, aber auch zur Erzielung niedrigster Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalte, setzt man den flüssigen Stahl einem verminderten Druck aus, d. h., der Stahl wird nach dem Abstich in die Pfanne einer Vakuumbehandlung bei Drücken von 100 Pa unterworfen (Abb. 3.2.2-9). Die Vakuumbehandlung von flüssigem Stahl erfolgt nach 4 Grundverfahren.

Bei der *Pfannenstandentgasung* wird eine Gießpfanne mit der Stahlschmelze in einen Behälter gestellt, der nach dem Schließen evakuiert wird. Durch die aus der Schmelze entweichenden Gase, insbesondere Kohlenmonoxid und Wasserstoff, werden eine teilweise Durchmischung des Pfanneninhalts erreicht und auch die tieferen Schichten in der Pfanne entgast. Durch Einleiten eines Spülgases (Argon) kann eine zusätzliche Durchwirblung und eine bessere Entgasung bewirkt werden. Nach dieser Methode werden Pfannen mit 20 bis ≈ 150 t Stahl entgast.

Bei der *Gießstrahlentgasung* läßt man den flüssigen Stahl in ein unter Vakuum stehendes Gefäß einströmen, wodurch der Stahl in kleinste Tröpfchen zerrissen wird, die günstige Bedingungen für die Entgasung liefern. Bei diesem Verfahren fließt der Stahl entweder aus der Abstichpfanne in die im Vakuumgefäß stehende Gießpfanne oder in eine Kokille. Letzteres Verfahren wird als *Vakuumblockguß* bezeichnet und ermöglichte bisher die Herstellung von Blöcken von 250 bis 300 t Masse.

Beim *Teilmengenentgasungsverfahren* oder auch *Vakuumheberverfahren* werden jeweils 10 bis 15 % des Pfanneninhalts durch den auf der Oberfläche des Stahls ruhenden Atmosphärendruck in das unter Vakuum stehende Entgasungsgefäß gesaugt, dort entgast und durch Anheben des Gefäßes oder Absenken der Pfanne wieder in die Pfanne entleert. Das Ansaugen und Entleeren wird so lange durchgeführt, bis jede Volumeneinheit des Stahls drei- bis sechsmal entgast und der gewünschte Entgasungsgrad erreicht worden ist. Zur Verminderung der Wärmeverluste während der Entgasung wird das Vakuumgefäß vorher auf Temperaturen von ≈ 1150 bis 1250 °C vorgeheizt. Das Verfahren wird für Pfanneninhalte bis 400 t angewendet.

Beim *Umlaufentgasungsverfahren* tauchen in die Pfannen 2 Rohre eines Entgasungsgefäßes ein, durch dessen Evakuieren der flüssige Stahl angesaugt und durch Einleiten eines Fördergases in eines der eintauchenden Rohre mit hoher Geschwindigkeit in das Gefäß befördert wird. Beim Durchlauf durch das Gefäß wird der Stahl entgast und beim Zurückfließen in die Pfanne der Pfanneninhalt gut durchmischt. Auch hier gilt, daß ≈ 10 bis 15 % des Pfanneninhalts sich jeweils im Vakuumgefäß befinden und der Stahl drei- bis sechsmal das Vakuumgefäß durchläuft. Die Entgasungszeit liegt je nach Schmelzmasse zwischen 10 und 15 min, und die Schmelzmassen erreichen ≈ 150 t.

Sonderumschmelzverfahren. Die steigenden Anforderungen an den Stahl im Hinblick auf seine Reinheit (Freiheit von nichtmetallischen, oxidischen und sulfidischen Einschlüssen, Gasen, wie Wasserstoff und Stickstoff) und seine Gleichmäßigkeit, wie sie bei hochbeanspruchten Maschinenteilen (hochtourigen Kugellagern, Dampf- und Gasturbinen) im Flugzeug- und Raketenbau auftreten, führten in den letzten 20 bis 25 Jahren zur Einführung von Sonderumschmelzverfahren, bei denen der bereits einmal im herkömmlichen Stahlerzeugungsverfahren gewonnene Stahl nochmals einem Umschmelzprozeß unterworfen wird. Der Anteil dieser hochreinen Stähle an der Gesamtstahlerzeugung beträgt in industriell hochentwickelten Ländern ≈ 1 %.

Wir unterscheiden dabei die unter Vakuum arbeitenden Verfahren, den *Vakuuminduktionsofen*, den *Vakuumlichtbogenofen* und den *Elektronenstrahlofen* sowie das ohne Vakuum arbeitende *Elektro-Schlacke-Umschmelz-Verfahren* sowie den *Plasmaofen*.

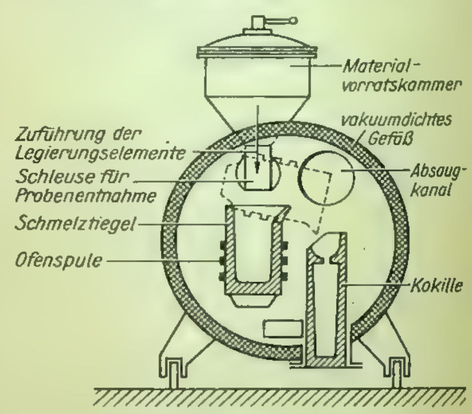


Abb. 3.2.2-10 *Vakuuminduktionsofen; gestrichelt = Gießstellung des Tiegels*

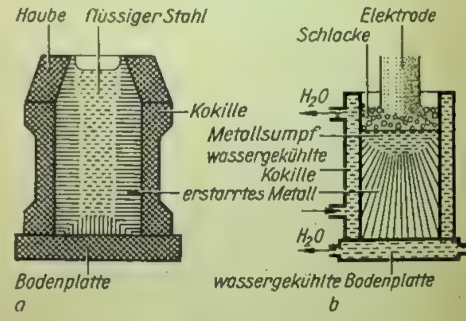


Abb. 3.2.2-11 *Unterschiedliche Blockerstarrung beim Gußblock (a) und Elektro-Schlacken-Umschmelz-Block (b)*

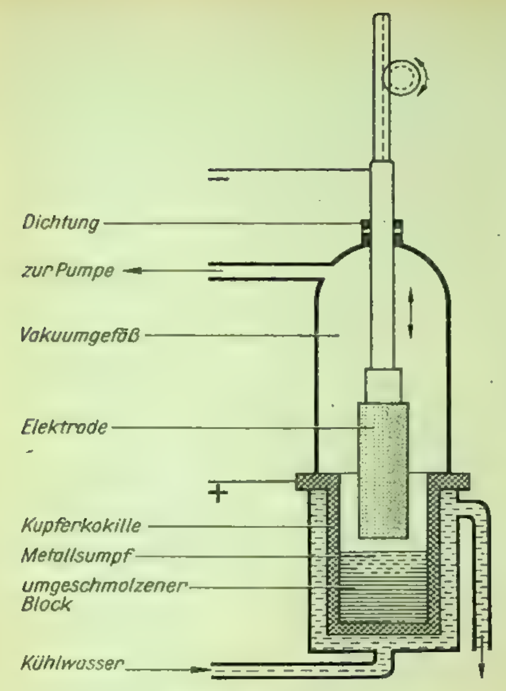


Abb. 3.2.2-12 *Vakuumlichtbogenofen*

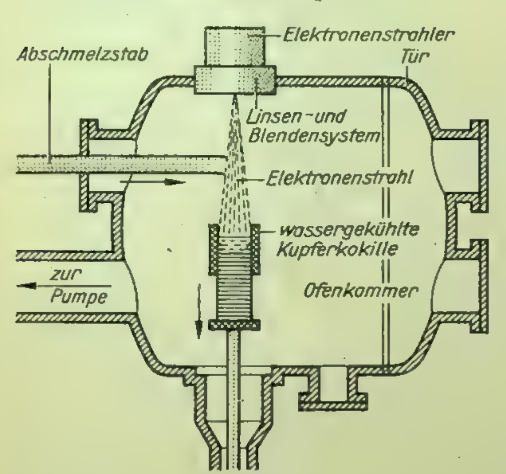


Abb. 3.2.2-13 *Elektronenstrahlofen*

Vakuuminduktionsofen. Es handelt sich dabei um ein dem offenen Induktionsofen entsprechendes Schmelzaggregat, bestehend aus Schmelztiegel (1) und Ofenspule (2) in einem vakuumdichten Gefäß (3), daß über einen Abzugskanal (7) evakuiert wird (Abb. 3.2.2-10). Der Einsatz kann kalt oder auch flüssig in den Ofen eingebracht werden. Während des Schmelzens bei einem Druck von ≈ 0,13 Pa können Legierungselemente aus einer Materialvorratskammer (4) zugeführt und über eine Schleuse Proben entnommen werden. Auch die Kokille (6) zum Vergießen des umgeschmolzenen Stahles befindet sich im Vakuumgefäß. Derzeitig werden Vakuuminduktionsöfen mit Schmelzmassen von wenigen Kilogramm bis 50 t gebaut.

Gemeinsames Merkmal der nachfolgend behandelten Verfahren des Vakuumlichtbogenofens, des Elektronenstrahlmehrkammerofens und des Elektro-Schlacke-Umschmelz-Verfahrens ist die Erstarrung der umgeschmolzenen Blöcke in einem wassergekühlten Kupferkristallisator (Abb. 3.2.2-11). Die Wärme fließt hier nicht wie in den üblichen Stahlwerkskokillen nach den Seiten ab, sondern bevorzugt zum Boden der Kokille. Die Kristalle wachsen deshalb vorwiegend längs der Blockachse, wodurch sich eine sehr gleichmäßige Blockstruktur ergibt und Verunreinigungen und Anreicherung von Eisenbegleitern in der Blockachse nicht oder kaum auftreten. Der auf diese Weise umgeschmolzene Stahl zeichnet sich durch eine hohe Gleichmäßigkeit in seinen mechanischen Eigenschaften aus.

Vakuumlichtbogenofen (Abb. 3.2.2-12). Ein schlanker Rohblock wird hierbei als selbstverzehrende Elektrode mit Gleichstrom hoher Stromstärke und niedriger Spannung bei einem Arbeitsdruck von ≈ 1,3 Pa in einem als Anode geschalteten wassergekühlten Kupferkristallisator abgeschmolzen. Die Legierung des Vakuumblocks wird durch die Legierung der Elektrode bestimmt. Im derzeitig größten Ofen können Blöcke bis zu 56 t Masse erzeugt werden. Der Vakuumlichtbogenofen kann auch unter Schutzgas (z. B. Argon) arbeiten.

Elektronenstrahlofen. Ein Abschmelzstab wird bei diesem Verfahren von einem Elektronenstrahl bei einem Arbeitsdruck im Gefäß von 10^{-1} bis 10^{-3} Pa abgeschmolzen (Abb. 3.2.2-13) und das abschmelzende Gut in einem wassergekühlten Kupferkristallisator mit absenkbarem Boden (*Strangabzugseinrichtung*) aufgefangen. In der DDR wird der vom Forschungsinstitut „*Manfred von Ardenne*" entwickelte *Elektronenstrahlmehrkammerofen (EMO)* eingesetzt, der den Vorteil hat, daß der empfindliche Elektronenstrahler durch mehrere Zwischenkammern vom eigentlichen Schmelzgefäß getrennt ist und bei Gasausbrüchen aus der Schmelze sowie durch verdampfende Legierungselemente und das Eisen selbst in seiner Funktion nicht beeinträchtigt werden kann. Elektronenstrahlmehrkammeröfen werden mit Strahlerleistungen zwischen 60 und 1 200 kW gebaut, und der größte Ofen kann Blockmassen bis zu 18 t erzeugen.

Elektro-Schlacke-Umschmelz-Verfahren (Abb. 3.2.2-14). Bei diesem Verfahren wird eine selbstverzehrende Elektrode in einem wassergekühlten Kupferkristallisator oder Strangabzugseinrichtung abgeschmolzen. Die benötigte Schmelz-

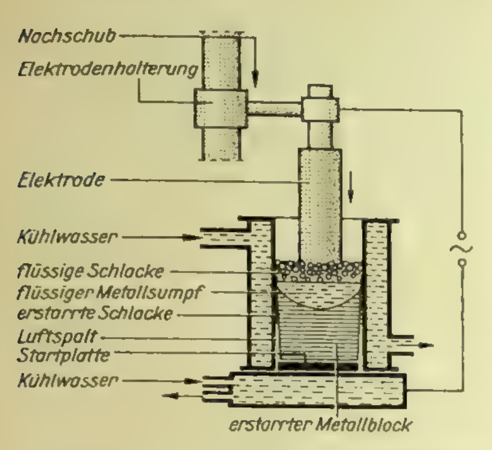


Abb. 3.2.2-14 Elektro-Schlacke-Umschmelzung

wärme entsteht beim Durchgang von Wechselstrom durch eine elektrisch leitende flüssige Schlacke, die in der Regel aus Flußspat (CaF_2) und Tonerde (Al_2O_3) besteht. Über der Schlacke befindet sich i. allg. Luft oder aber auch ein Schutzgas. Die flüssige Schlacke nimmt beim Durchgang der Metalltröpfchen die im Stahl befindlichen nichtmetallischen Einschlüsse auf, wodurch ein sehr reiner Block entsteht. Die Blockoberfläche wird durch eine dünne Schlakkenschicht von der Kokille isoliert und zeigt eine sehr gute Beschaffenheit. Das Verfahren wurde von dem *Paton-Institut* in Kiew entwickelt und wird in allen stahlerzeugenden Ländern angewendet. Bisher sind Anlagen für die Erzeugung von Blöcken bis zu 160 t Masse bekannt.

Plasmaofen (Abb. 3.2.2-15). Zum Schmelzen wird ein Plasmalichtbogen zwischen der Katode oder dem Brenner und dem Einsatz gebildet, der in leitender Verbindung mit einer Bodenelektrode (Anode) steht. Als Arbeitsgas wird für die Bildung des Lichtbogens meist Argon verwendet, und der Plasmalichtbogen führt dem

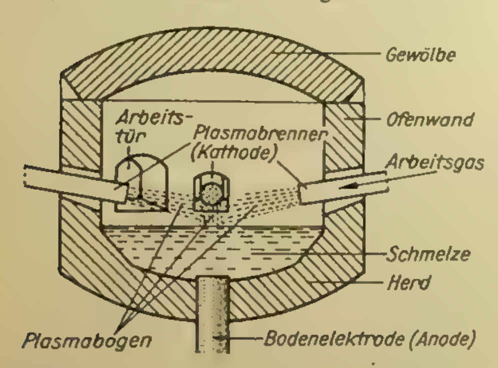


Abb. 3.2.2-15 Plasmaschmelzofen mit Schrägbrennern

Schmelzgut die zum Aufschmelzen notwendige Energie mit einer hohen Intensität zu. Außerdem wirkt das Arbeitsgas gleichzeitig als Schutzgas im Ofen. Als Primärschmelzaggregat sind dadurch gute Bedingungen für die Erzeugung von hochlegierten Stählen mit einem guten Reinheitsgrad gegeben. Als Technologie wird meist das Umschmelzen ohne Frischperiode angewendet, wie sie für den Elektrolichtbogenofen üblich ist. Es wird bei dieser Technologie ein hohes Legierungsausbringen von 97 bis 99% für Mangan, Chrom, Nickel und Molybdän erreicht. Infolge der hohen Temperaturen des Plasmalichtbogens von 10^4 °C werden Oberflächentemperaturen des Stahls von ≈ 1750°C erreicht, und die feuerfeste Auskleidung des Ofengefäßes wird stark beansprucht. Für die Auskleidung des Ofens müssen deshalb hochwertige basische, feuerfeste Materialien verwendet werden. Im Edelstahlwerk „8. Mai 1945" Freital sind 10- und 30-t-Öfen in Betrieb (Tafel 13). Der Plasmalichtbogen wird in der UdSSR auch als Energiequelle zum Umschmelzen von Stahl in einem wassergekühlten Kupferkristallisator wie beim Elektronenstrahlofen angewendet.

3.3. Gewinnung von Nichteisenmetallen

Nichteisenmetalle (NE-Metalle) unterteilt man nach ihrer Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einflüsse in *edle* und *unedle Metalle*, nach ihrer Dichte in *Schwermetalle* ($\varrho > 4{,}5$ g/cm³) und *Leichtmetalle* ($\varrho < 4{,}5$ g/cm³). Schwermetalle werden allgemein noch in *schwere Buntmetalle* (Blei, Zink, Zinn, Kupfer, Nickel, Kobalt, Wismut, Kadmium), *Edelmetalle* (Gold, Silber, Platin, Platinmetalle) und *Stahlveredler* (Chrom, Nickel, Molybdän, Vanadin, Wolfram) unterschieden. *Buntmetalle* erhielten ihre Bezeichnung aufgrund der bunten Farben ihrer Erze und Verbindungen, nicht jedoch nach den Metallfarben.

Die Übergangsmetalle des Periodensystems (Titan, Zirkonium, Hafnium, Vanadin, Niob, Tantal, Chrom, Molybdän, Wolfram) werden wegen ihres hohen Schmelzpunkts und ihrer großen Reaktionsfähigkeit als *hochschmelzende reaktive Metalle* bezeichnet. *Seltene Metalle* (Indium, Thallium, Germanium, Beryllium, Selen, Tellur, Rubidium, Zäsium u. a.) erhielten ihre Bezeichnung, weil sie nur als Begleitelemente auftreten, keine eigenen Erze besitzen und nur in geringen Mengen technisch genutzt werden. Zur Verwendung der NE-Metalle vgl. 3.1.3.

Die Rohstoffe für die Erzeugung der NE-Metalle enthalten immer neben wertvollen auch störende Beimengungen. Aufgabe der NE-Metallurgie ist es, das Hauptmetall auf wirtschaftliche Weise in der für den weiteren Verwendungszweck entsprechenden Reinheit zu gewinnen und die Ne-

benbestandteile des Erzes nutzbar zu machen. Nach dem *Reinheitsgrad* unterscheidet man *Roh-* oder *Schwarzmetalle* (97 bis 99,5%), *Rein-* oder *Feinmetalle* (99,99%) und *Reinstmetalle* (99,999% = 5-N-Metall). Ein *Sechsneunermetall (6-N-Metall)* (99,9999% hat max. 0,0001% Verunreinigungen, d. h., 1 g/t = 1 *ppm (part per million)*.

3.3.1. Verfahren der NE-Metallurgie

Pyro- oder *Trockenmetallurgie* nennt man die Gewinnung und Raffination von NE-Metallen bei höheren Temperaturen im Gegensatz zur *Hydro-* oder *Naßmetallurgie*, bei der diese Prozesse in wäßrigen Lösungen ablaufen. Zur *Elektrometallurgie* zählt man pyro- oder hydrometallurgische Verfahren unter Verwendung elektrischen Stroms.

Die in der NE-Metallurgie gebräuchlichen Verfahren lassen sich in folgende Gruppen unterteilen: vorbereitende Verfahren, Verfahren zur Herstellung des metallischen Zustands, Verfahren zur Raffination der Metalle und Sonderverfahren.

Vorbereitende Verfahren haben die Aufgabe, die Ausgangsmaterialien in eine für den Prozeß der Metallgewinnung physikalisch und chemisch günstigere Form zu bringen.

Trocknen dient der Entfernung von Feuchte und wird bei Temperaturen bis zu 120°C durchgeführt.

Brennen oder ***Kalzinieren*** hingegen dient dem Austreiben chemisch gebundenen Wassers (Hydrat- oder Kristallwasser) oder Kohlendioxids aus den Rohstoffen, wozu Temperaturen von 500 bis 1200°C notwendig sind.

Rösten ist das Erhitzen von Erzen, Konzentraten oder Zwischenprodukten unter Luftzutritt zur Überführung von Metallsulfiden, -arseniden oder -antimoniden in Oxide. Bei dieser *oxidbildenden Röstung* werden die entstehenden flüchtigen Sauerstoffverbindungen des Schwefels, Arsens oder Antimons mit den Röstgasen entfernt. Durch entsprechendes Einstellen von Temperatur und Luftzufuhr kann die Röstung auch so geführt werden, daß die Sulfide weitgehend in Metallsulfate, die meist gut wasserlöslich sind, überführt werden (*sulfatbildende Röstung*). Bei der *chloridbildenden Röstung* erhält man durch Zusatz von Chlorierungsmitteln Metallchloride, die wasserlöslich oder leicht flüchtig sind.

Sintern oder ***Agglomerieren*** überführt feinkörnige Rohstoffe unter thermischer Einwirkung durch oberflächliches Verschmelzen oder Verschweißen der Körner in ein stückiges, festes und poröses Material. Der Prozeß läuft meist gleichzeitig mit einer oxidbildenden Röstung ab (*Sinterröstung*). Im Gegensatz dazu wird bei der *Pulverröstung* der feinkörnige Zustand beibehalten.

Thermische Konzentration dient der Anreicherung der Metallinhalte von Rohstoffen oder Zwischenprodukten durch Verflüchtigen, Konzentrationsschmelzen oder partielle Reduktion.

Unter *Verflüchtigen* versteht man die Überführung des Metalls in eine leicht verdampfbare Verbindung und seine Sammlung in einem *Flugstaub*.

Beim *Konzentrationsschmelzen* wird das zu gewinnende Metall in einer Stein- oder Speisephase angereichert. *Steine* sind aus mehreren Sulfiden bestehende Zwischenprodukte, die eine beträchtliche Löslichkeit für Metalle (vor allem auch für Edelmetalle) besitzen. Analog dazu sind *Speisen* Arsenidmischungen.

Hydrometallurgischer Aufschluß dient der Überführung der zu gewinnenden Metalle in eine wäßrige Lösung mit Hilfe von Säuren, Laugen oder Salzlösungen mit dem Ziel, die wertlosen Gangartbestandteile abzutrennen.

Metallgewinnungsverfahren überführen die Metalle aus der in den Rohstoffen oder Zwischenprodukten vorliegenden Verbindungsform in den metallischen Zustand.

Reduktion nennt man die Zerlegung von Metalloxiden durch Zugabe eines Elements oder einer Verbindung, die sauerstoffaffiner als das zu gewinnende Metall sind und dabei selbst oxydiert werden. Die wichtigsten in der NE-Metallurgie verwendeten Reduktionsmittel sind Kohlenstoff, Kohlenmonoxid, Wasserstoff und unedle Metalle, wie Aluminium, Magnesium, Silizium (*metallothermische Reduktion*).

Röstreaktionsarbeit. Röstung und Reaktion der Röstprodukte mit dem sulfidischen Ausgangsmaterial laufen neben- oder nacheinander im gleichen Reaktionsraum ab, z. B. bei der Kupfergewinnung im Konverter

$$Cu_2S + 3/2\,O_2 \rightarrow Cu_2O + SO_2\text{: Röstung}$$
$$Cu_2S + 2\,Cu_2O \rightarrow 6\,Cu + SO_2\text{: Reaktion}$$

oder bei der Bleigewinnung nach dem Herdverfahren

$$PbS + 2\,O_2 \rightarrow PbSO_4\text{: Röstung}$$
$$PbS + PbSO_4 \rightarrow 2\,Pb + 2\,SO_2\text{: Reaktion.}$$

Bei der *elektrochemischen Reduktion* erfolgt die Herstellung des metallischen Zustands durch Reduktionselektrolyse oder durch Zementation. Durch die Reduktionselektrolyse wird das Metall mit Hilfe von Gleichstrom aus einer wäßrigen Lösung von Metallsalzen oder aus einem schmelzflüssigen Salzgemisch an der Katode abgeschieden (vgl. 3.3.5.), während die Anode, an der eine Gasentwicklung stattfindet, unlöslich ist.

Zementation ist die Verdrängung (*Ausfällung*) eines Metalls aus seiner wäßrigen Salzlösung (Ionenform) durch ein elektrochemisch unedle-

res Metall, das seinerseits dabei in Lösung geht.

Raffinationsverfahren haben das Ziel, die bei der Reduktion anfallenden Rohmetalle auf die dem Verwendungszweck entsprechende Reinheit zu bringen, wobei Unterschiede in den physikalischen und chemischen Eigenschaften zwischen Hauptmetall und Verunreinigungen ausgenutzt werden.

Seigern ist das Trennen von Metallen oder ihren Verbindungen aufgrund der temperaturabhängigen Löslichkeit. Beim *Seigern mit steigender Temperatur* wird durch vorsichtiges Erhitzen die niedriger schmelzende Komponente ausgeschmolzen, während beim *Seigern mit fallender Temperatur* die höherschmelzende Komponente durch Abkühlen einer Schmelze in fester Form ausgeschieden wird.

Bei der *intermetallischen Fällung* wird durch Zugabe einer weiteren Komponente die Löslichkeit eingeschränkt; die Abtrennung erfolgt durch Seigern.

Destillation ist ein Verfahren der Metallraffination, bei dem die unterschiedlichen Dampfdrücke von Hauptmetall und Verunreinigung zur Trennung genutzt werden.

Beim *Polen* werden Verunreinigungen mittels Durchwirbelung des Metallbads durch im Bad entstehende Gase entfernt.

Die *selektive Oxydation* nutzt die höhere Affinität der Verunreinigungselemente zu Sauerstoff, Schwefel oder Chlor zur Trennung aus, wobei die Verunreinigungen in den entsprechenden Reaktionen in eine Raffinierschlacke (auch *Krätze* oder *Abzug* genannt) übergehen.

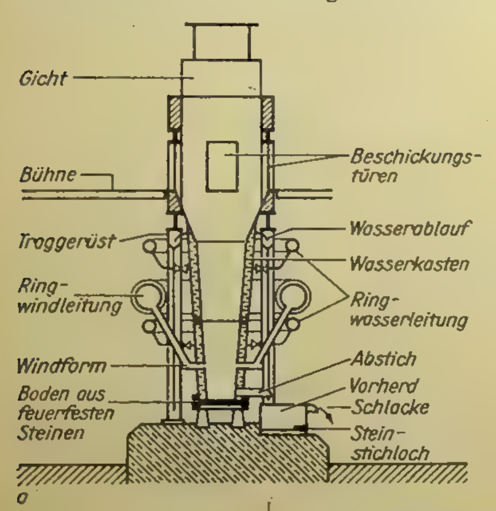
In der *Raffinationselektrolyse* wird das meist nur noch die Edelmetalle enthaltende, vorraffinierte Metall als lösliche Anoden eingebracht. Unter Wirkung von Gleichstrom geht das Hauptmetall als Ion in Lösung, wandert zur Katode und wird dort als reines Metall abgeschieden. Die im Anodenmetall enthaltenen Edelmetalle werden nicht gelöst und auch vom Elektrolyten nicht angegriffen, so daß sie sich in metallischer Form im *Anodenschlamm* anreichern.

Sonderverfahren der Reinstmetalldarstellung. Das *Ionenaustauschverfahren* nutzt die Eigenschaft bestimmter Kunstharze, austauschfähige Ionen (Kationen oder Anionen) gegen Ionen einer Salzlösung auszutauschen und sie bei entsprechender Behandlung (*Elution*) wieder abzugeben. Auf diese Weise wird z. B. Uran von Verunreinigungen getrennt.

Bei der *Flüssig-Flüssig-Extraktion* wird die Trennung durch die unterschiedliche Löslichkeit zweier Komponenten in einer wäßrigen und einer organischen Phase bewirkt, z. B. Arsenentfernung aus Germanium. Bei Vermischung der organischen mit der mehrere Komponenten enthaltenden wäßrigen Phase nimmt diese je nach den Löslichkeitsverhältnissen eine Komponente teilweise oder vollständig auf. Nach Abtrennung der organischen Phase wird die in ihr gelöste Komponente in eine wäßrige Phase reextrahiert.

Bei dem *Aufwachsverfahren* (nach *van Arkel* und *de Boer*) wird eine flüchtige Verbindung (meist Jodid) eines hochschmelzenden Metalls im Vakuum an einem stromdurchflossenen Wolframglühfaden bei 1200 bis 1800°C thermisch zersetzt. Reinstmetall scheidet sich am Faden ab und wächst zu einem Stab, während der frei werdende Joddampf bei Temperaturen zwischen 200 und 600°C mit dem verunreinigten Metallpulver zu Metalljodid reagiert, also im Kreislauf geführt wird.

Zonenschmelzen beruht auf den Unterschieden in der Löslichkeit von Verunreinigungen im festen und flüssigen Metall. Deshalb wird eine



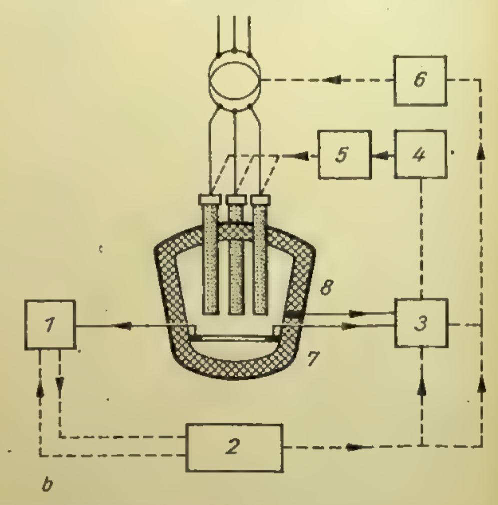


***Abb. 3.3.2-1** Kupferschachtofen (a) und automatische Regelung eines Lichtbogenofens (b)*

schmale Zone eines Metallstabes durch Widerstandsbeheizung oder auch induktiv aufgeschmolzen, die durch Bewegung des Stabs oder der Heizung durch den Stab wandert. Die Verunreinigungen reichern sich in der Schmelzzone an, wandern mit durch den Stab und werden nach dem Erstarren mit dem Stabende abgetrennt. Durch mehrfaches Wiederholen des Vorgangs erhält man höchste Reinheiten. Der Vorgang wird meist in horizontalen Schiffchen durchgeführt, mitunter aber auch tiegelfrei mit einem vertikalen, rotierenden Stab (*Zonenfloating*), wenn wie bei Silizium durch die hohe Schmelztemperatur Reaktionen mit dem Schiffchenmaterial zu erwarten sind.

Einkristallziehen ist die Züchtung idealer Festkörper (Einkristalle) mit minimalen Gitterbaufehlern im atomaren Bereich. Ein Kristallkeim wird dazu in die gereinigte Schmelze getaucht und im Vakuum oder unter Schutzgas langsam rotierend herausgezogen.

3.3.2. Metallurgie der schweren Buntmetalle

Kupfer (Cu, Schmelztemperatur 1083 °C, Dichte 8,93 g/cm³) wird überwiegend aus Aufbereitungskonzentraten (vgl. 1.6.4.) gewonnen, in denen meist Kupfersulfid, seltener Kupferoxid, vorkommt.

Sulfidische Konzentrate werden je nach ihrem Schwefelgehalt partiell geröstet oder ungeröstet im *Spurschachtofen* (Abb. 3.3.2-1a) oder *Flammofen* (Abb. 3.3.2-2), seltener im *Elektroofen* (Abb. 3.3.2-1b), zu *Kupferstein* (Gemisch von Cu_2S und FeS mit 40 % Cu) verschmolzen. Der Kupferstein wird im liegenden Konverter durch Einblasen von Luft zunächst durch Oxydation des FeS zu FeO und dessen Verschlakkung mit SiO_2 zu *Spurstein* (Cu_2S mit 79 % Cu) angereichert und im Anschluß daran durch Röstreaktion zu *Schwarz-* oder *Blasenkupfer* (> 97,5 % Cu) verblasen. Schwarzkupfer wird im Herdflamm- oder Drehflammofen durch selektive Oxydation der Verunreinigungen raffiniert, die als Krätze abgezogen werden. Gelöstes SO_2 wird durch *Dichtpolen* mit nassem Holz oder mit Öl, Cu_2O mit trockenem Holz und Holzkohle (*Zähpolen*) entfernt. Das hauptsächlich noch Edelmetalle enthaltende Raffinadekupfer (> 99,75 % Cu) wird zu Anoden vergossen und in wäßriger, schwefelsaurer $CuSO_4$-Lösung durch Raffinationselektrolyse zu Elektrolytkupfer (E-Cu, 99,99 % Cu) verarbeitet. E-Cu wird in Form von Katoden verkauft oder zu Drahtbarren (engl. *wire bars*), Walzplatten, Rundbolzen u. a. vergossen. Bei besonders hohen Ansprüchen an die Leitfähigkeit wird sauerstofffreies Kupfer (OFHC-Kupfer = *oxygen free high conductivity*) gefordert.

Oxidische Konzentrate werden meist hydrometallurgisch verarbeitet, indem ihr Kupfergehalt in eine wäßrige Kupfersalzlösung überführt wird, aus der das Kupfer durch Zementation mit Eisenschrott (*Zementkupfer*) oder elektrolytisch mit unlöslichen Anoden gewonnen wird. Die Qualität dieses Kupfers erfordert meist noch weitere Raffinationsschritte. Die Verarbeitung von *Kupferschrotten* u. a. kupferhaltigen Sekundärrohstoffen richtet sich nach ihrem Kupfergehalt und den vorhandenen Verunreinigungen. Reine Schrotte werden gemeinsam mit Schwarzkupfer oder auch getrennt im Flammofen raffiniert; Legierungsschrotte, wie z. B. Messing, Rotguß, werden im Konverter zu Schwarzkupfer verblasen, oxidische Rückläufe, Messingaschen und Kupferschlacken im Schachtofen auf Schwarzkupfer verschmolzen und anschließend weiter raffiniert.

Blei (Pb, Schmelztemperatur 327,5 °C, Dichte 11,34 g/cm³) wird überwiegend aus sulfidischen Erzen oder Konzentraten gewonnen.

Werkblei (Rohblei) wird heute meist durch *Röstreduktionsarbeit* erzeugt. Das sulfidische Ausgangsprodukt wird durch Sinterröstung entschwefelt und gleichzeitig *agglomeriert* (stükkig gemacht). Der entstandene Sinter wird im Schachtofen mit Koks reduzierend zu Werkblei (> 96 % Pb) verschmolzen. Die in unterschiedlichen Konzentrationen enthaltenen Verunreinigungen (hauptsächlich Kupfer, Zinn, Arsen, Antimon, Wismut und Edelmetalle) werden in

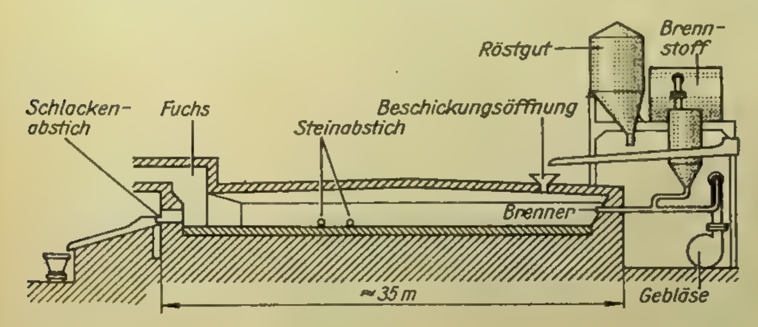


Abb. 3.3.2-2 Kontinuierlich arbeitender Großflammofen zur Kupfergewinnung

einem mehrstufigen Raffinationsprozeß entfernt. Kupfer wird durch Seigern mit fallender Temperatur bis ≈ 0,1 % und anschließendem Einrühren von elementarem Schwefel weiter entzogen. Zinn, Arsen und Antimon entfernt man durch Einblasen von Luft im Flammofen (Abb. 3.3.2-3) durch selektive Oxydation. Die entstehenden leichteren Oxide werden von der Oberfläche des Bleibades abgezogen (abgestrichen). Aus den sog. Abstrichen (Zinn-, Arsen- oder Antimonabstrich) werden Bleilegierungen erzeugt, da an ihnen noch erhebliche Mengen Blei, vorwiegend mechanisch, anhaften. So ist z. B. *Hartblei* eine Blei-Antimon-Legierung, die aus dem Antimonabstrich hergestellt wird. Edelmetalle werden entweder durch *Zinkentsilberung* (Parkes-Verfahren) oder durch Raffinationselektrolyse (nach *Betts*) entfernt. Beim *Parkes-Verfahren* wird die edelmetallhaltige Bleischmelze mit Zink gesättigt und anschließend langsam abgekühlt, wobei spezifisch leichtere Blei-Zink-Edelmetall-Mischkristalle ausscheiden, die als sog. *Schaum* abgeschöpft und der Edelmetallgewinnung zugeführt werden. Der Zinküberschuß wird durch Destillation oder durch Polen aus dem Blei entfernt. Bei der *Raffinationselektrolyse*, die in kieselfluorwasserstoffsauren Elektrolyten durchgeführt wird, läßt sich neben den Edelmetallen auch Wismut abtrennen. Wird keine elektrolytische Bleiraffination angewendet, so kann das Wismut durch intermetallische Fällung mit Kalzium und Magnesium (*Kroll-Betterton-Verfahren*), die in Form von Bleilegierungen eingebracht werden, entfernt werden. Im Ergebnis des Raffinationsprozesses erhält man *Hüttenweichblei* (99,9 % Pb) oder *Elektrolytblei* (99,99 % Pb).

Bleischrott und bleihaltige Rückstände werden je nach ihrer Beschaffenheit im Kessel, Schacht- oder Drehflammofen zu Werkblei oder bleihaltigen Legierungen verarbeitet.

Zink (Zn, Schmelztemperatur 419,5 °C, Dichte 7,13 g/cm³) wird vorwiegend aus sulfidischen Konzentraten (Zinkblende, ZnS), seltener aus *Galmei* ($ZnCO_3$) und oxidischen Zwischenprodukten gewonnen. Die Zinkgewinnung geschieht auf trockenem Wege durch karbothermische

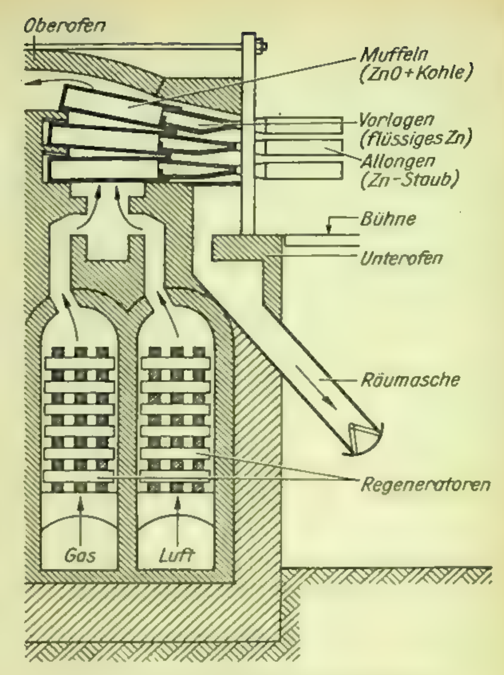


Abb. 3.3.2-4 *Zinkmuffelofen (Halbschnitt)*

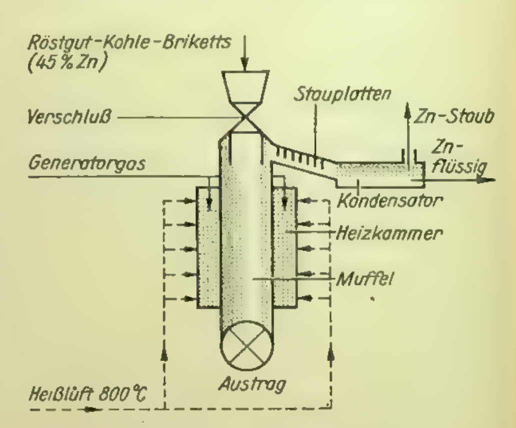


Abb. 3.3.2-5 *Zinkdestillation in stehender Retorte (New-Jersey-Verfahren)*

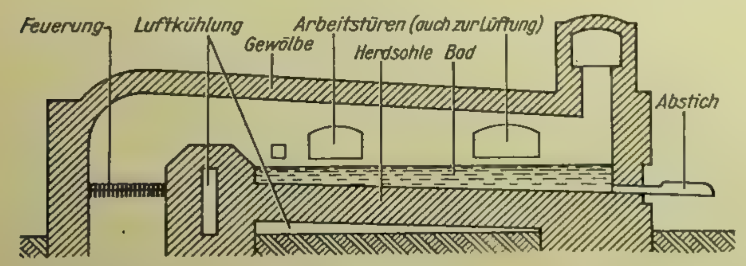


Abb. 3.3.2-3 *Flammofen zur Bleiraffination*

Reduktion oder auf nassem Wege durch Reduktionselektrolyse.

Rohzinkgewinnung auf trockenem Wege erfolgt nach oxidbildender Röstung des sulfidischen Rohstoffs durch Reduktion des entstandenen Zinkoxids (Röstgut) bei Überschuß von Reduktionskohle im Temperaturbereich zwischen 1 200 und 1 300 °C. Da Zink bei diesen Temperaturen als Zinkdampf (Siedepunkt 907 °C) anfällt, müssen Reaktions- und Feuerungsraum getrennt werden (*Muffelöfen*), um die Oxydation des unedlen Zinks zu vermeiden. Das Verfahren wird entweder diskontinuierlich in liegenden *Tonmuffeln* (Abb. 3.3.2-4), die in einer Ofeneinheit mit Regenerativfeuerung zu Batterien zusammengefaßt sind, oder kontinuierlich in *stehenden Muffeln* (Abb. 3.3.2-5) aus Siliziumkarbid durchgeführt. Aus dem den Reaktionsraum entweichenden Gemisch aus Zinkdampf und Kohlenmonoxid wird das Zink durch *Kondensation* gewonnen.

Bei der diskontinuierlichen Arbeitsweise wird die Hauptmenge des Zinks in den *Vorlagen* als *Hüttenzink* (98,5 % Zn) und der Rest in den Allongen als Zinkstaub ausgebracht. Der zinkhaltige Reduktionsrückstand (*Räumasche*) wird im Drehrohrofen durch reduzierende Verflüchtigung vom restlichen Zink befreit.

Beim kontinuierlichen *New-Jersey-Verfahren* werden in die *stehende Retorte* (vgl. Abb. 3.2.2-5) Briketts aus einem Gemisch von Röstgut und Kohle eingesetzt und beheizt; der entstehende Zinkdampf kondensiert zu einem reineren Rohzink (99,5 % Zn). Neben diesen beiden hauptsächlichsten Verfahren kann Zink auf thermischem Wege durch Reduktion im Elektroofen oder im Schachtofen (*Imperial-Smelting-Verfahren*) gewonnen werden. Bei letzterem Verfahren werden Zink und Blei in einem Arbeitsgang in einem Spezialschachtofen gewonnen. Blei wird wie üblich im Tiegel abgestochen, während Zink mit den heißen Gasen aus dem Ofen entfernt und in einem *Sprühkondensator* durch Bleitröpfchen aus dem Gas ausgewaschen wird. Das im Blei gelöste Zink trennt sich außerhalb des Kondensators durch Abkühlung als flüssige Schicht vom Blei, das in den Kondensator im Kreislauf zurückgeführt wird.

Rohzinkraffination erfolgt durch Seigerung bzw. Destillation. Beim Seigern werden Eisen (als *Hartzink*, eine Eisen-Zink-Legierung) und die Hauptmenge des Bleis (als Blei-Zink-Legierung) entfernt. Zur Gewinnung von Feinzink (99,99 % Zn) wird das in der stehenden Muffel erzeugte Zink einer *fraktionierten Destillation* zur Entfernung von Blei und Kadmium unterzogen.

Zinkgewinnung auf nassem Wege erfolgt durch schwefelsaure Laugung des Röstguts mit der Endlauge (H_2SO_4) der Elektrolyse. Nach sorgfältiger Reinigung der Lauge zur weitestgehenden Entfernung von Verunreinigungsmetallen wird das Zink aus der Zinksulfatlauge elektrolytisch auf Aluminiumkatoden niedergeschlagen. An den unlöslichen Bleianoden entstehen Schwefelsäure, die zur Laugung zurückgeht, und Sauerstoff. Das von den Katoden abgezogene *Elektrolytzink* (99,99 % Zn) wird umgeschmolzen und zu Platten vergossen.

Zinn (Sn, Schmelztemperatur 232 °C, Dichte 7,28 g/cm³) wird nahezu ausschließlich aus Zinnstein (SnO_2) gewonnen.

Rohzinn wird durch karbothermische Reduktion im Schacht-, Flamm- oder Elektroofen aus Zinnsteinkonzentraten oder Flugstäuben bei 1 200 bis 1 300 °C erzeugt. Die Zinngehalte armer Konzentrate, Zwischenprodukte und zinnhaltiger Schlacken werden durch Verflüchtigungsverfahren in einem Flugstaub konzentriert, da die direkte Zinngewinnung aus ihnen nicht möglich ist. Rohzinn (> 97 % Sn) enthält vor allem Eisen, Arsen, Kupfer und Wismut.

Rohzinnraffination erfolgt durch Seigern und Polen zur Entfernung von Eisen und Arsen bzw. durch selektive Sulfidbildung zur Kupferabtrennung. Das entstehende *Hüttenzinn* (99,6 bis 99,9 % Sn) ist für die meisten Einsatzgebiete verwendbar. Ist hingegen Wismut enthalten oder werden höhere Qualitätsanforderungen gestellt, muß noch eine elektrolytische Raffination in natriumsulfidhaltigen basischen oder kieselfluorwasserstoffsauren Elektrolyten durchgeführt werden. Dabei erhält man *Elektrolytzinn* (99,95 % Sn).

Altmaterial, wie Lotrückstände, Lager, verzinnte Kühler, Zinnaschen u. ä., wird vorwiegend zu zinnhaltigen Legierungen verarbeitet.

Nickel (Ni, Schmelztemperatur 1 453 °C, Dichte 8,90 g/cm³) wird aus sulfidischen, arsenidischen oder oxidischen Erzen erzeugt.

Sulfidische Nickelerze enthalten meist auch Kupfer und werden im Flammofen zu einem eisenhaltigen Rohstein verschmolzen. Durch Verblasen im Konverter entfernt man das Eisen, wobei ein *Kupfer-Nickel-Feinstein (Nickelmatte)* entsteht.

Die Kupfer-Nickel-Trennung erfolgt entweder elektrolytisch, indem zuerst Kupfer und in einer weiteren Stufe das Nickel niedergeschlagen werden (*Elektrolytnickel*), oder nach dem *Karbonyl-Verfahren*. Hierbei wird das Nickel mit Kohlenmonoxid bei Normal- oder Hochdruck zu leichtsiedendem *Nickeltetrakarbonyl* umgesetzt, das zu Nickelpulver oder -granalien (*Mond-Nickel*) thermisch zersetzt wird.

Von *arsenidischen Nickelerzen* wird das Nickel in einer Schmelze (Speise) konzentriert. Durch Rösten der Speise und Laugen des Röstguts mit Schwefelsäure sowie Laugenreinigung wird ein Ausgangsprodukt für die Elektrolytnickelherstellung erzeugt.

Oxidische Nickelerze sind kupferfrei, aber eisenhaltig, und werden zu *Ferronickel* verschmolzen,

das gegebenenfalls nach weiterer Konzentration seines Nickelgehalts durch partielle Oxydation des Eisens als Stahlveredler Verwendung findet oder zu reinem Nickel weiterverarbeitet wird.
Aus *nickelarmen Erzen* wird durch ammoniakalische Drucklaugung und Wasserstoffreduktion Nickelpulver oder über das Zwischenprodukt Nickelkarbonat Elektrolytnickel hergestellt.

3.3.3. Metallurgie der Edelmetalle

Silber (Ag, Schmelztemperatur 960,5 °C, Dichte 10,50 g/cm^3) kommt z. T. *gediegen* (in metallischer Form) oder in Silbererzen vor; mehr als 80 % werden jedoch als Nebenprodukt bei der Herstellung anderer Metalle, wie Blei, Kupfer und Nickel, gewonnen.
Das in Kupfer- oder Nickelerzen enthaltene Silber reichert sich im Anodenschlamm der Raffinationselektrolyse an. Aus dem Werkblei wird Silber durch Zinkentsilberung (*Parkes-Verfahren*, vgl. 3.3.2., Blei) oder ebenfalls durch Elektrolyse gewonnen.
Vorlaufmaterialien mit geringen Silbergehalten werden im Bleischachtofen auf ein silberhaltiges Werkblei verschmolzen, das weiter zu *Reichblei* verarbeitet wird. Reichblei wird im *Treibeofen* (*Treibeherd*, Abb. 3.3.3-1) bei ≈ 900 °C durch Oxydation des Bleis konzentriert. Die dabei entstehende *Bleiglätte* (PbO) wird ständig entfernt, bis das letzte Glättehäutchen die Silberoberfläche freigibt (*Blicksilber*). Reiche Anodenschlämme u. a. silberreiche Vorlaufmaterialien werden beim Treibeprozeß zugesetzt (*Eintränkarbeit*). Blicksilber wird elektrolytisch in salpetersaurer Lösung raffiniert, wobei an der Katode *Elektrolytsilber* (> 99,9 % Ag) anfällt, während sich Gold und Platinmetalle im Anodenschlamm anreichern.
Gold-Silber-Scheidung bei der Aufarbeitung von Rückläufen und edelmetallhaltigen Abfällen geschieht ebenfalls auf elektrolytischem Wege.

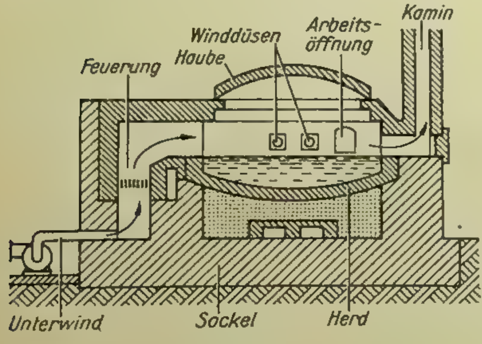


Abb. 3.3.3-1 *Treibeofen*

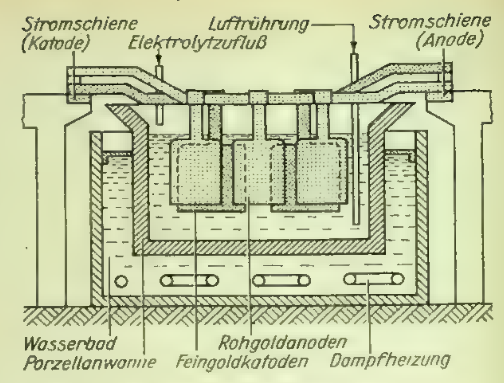


Abb. 3.3.3-2 *Goldelektrolysebad*

Zyanidlaugung. Feingemahlene Edelmetallerze (Silber-, Golderze) werden mitunter mit Natriumzyanid gelaugt. Die Edelmetalle werden mit Zink aus der Lösung zementiert, und der anfallende Fällschlamm wird gewaschen, mit Schwefelsäure von Zink befreit und zu Anoden verschmolzen.
Gold (Au, Schmelztemperatur 1 063°C, Dichte 19,3 g/cm^3) kommt gediegen in Form von Körnern (*Grobgold*), Klumpen (*Nuggets*) bzw. feinstverteilt (*Seifen-* oder *Waschgold*) sowie als Beimengung in Buntmetallerzen und Pyrit vor.
Amalgamation. Das mechanisch nicht abtrennbare, feinverteilte Gold wird durch Legieren mit Quecksilber (*Amalgamieren*) vom tauben Gestein getrennt. Durch Abdestillation des Quecksilbers aus dem *Amalgam* wird *Rohgold* gewonnen, das wie das mechanisch abgetrennte Grobgold zu Anoden vergossen wird.
Elektrolyse. Die in salzsaurer Lösung durchgeführte Raffinationselektrolyse (Abb. 3.3.3-2) liefert *Feingoldkatoden* (99,95 % Au). Silber, Iridium, Ruthenium und Rhodium reichern sich im Anodenschlamm an, während Platin und Palladium in Lösung gehen und durch Aufarbeitung des Elektrolyten gewonnen werden.
Platin und Platinmetalle – Palladium (Pd), Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Osmium (Os) und Iridium (Ir) – kommen gediegen, meist gemeinsam in Seifen bzw. vor allem in Nickelerzen vor. Die Gewinnung erfolgt aus Rohkonzentraten oder metallurgischen Zwischenprodukten je nach Zusammensetzung und Verunreinigungen in einem komplizierten, vielstufigen, naßmetallurgischen Prozeß (vgl. Silber).

3.3.4. Metallurgie sonstiger Schwermetalle

Quecksilber (Hg, Schmelztemperatur 38,8 °C, Siedepunkt 357 °C, Dichte 13,54 g/cm^3) wird hauptsächlich aus *Zinnober* (HgS), seltener als Beimengung aus anderen Erzen gewonnen. Reiche Erze werden in Muffeln unter Luftabschluß

über den Siedepunkt des Quecksilbers erhitzt. Durch Zugabe von Eisen und Kalk wird der Schwefel abgebunden, das Metall wird aus der Dampfphase kondensiert.
Arme Erze werden unter Luftzutritt bei 500 bis 600 °C geröstet. Dabei verflüchtigt sich ihr Quecksilberinhalt, der durch Kondensation ausgebracht wird. Aus der neben dem flüssigen Metall entstehenden, mit Quecksilber versetzten Masse (*Stupp*) wird das Metall durch Pressen bis auf 40 % entfernt, bevor sie in den Prozeß zurückgeht. Das auf diese Weise gewonnene Metall besitzt eine Reinheit von 99,995 % Hg.
Durch Waschen mit Salpetersäure oder Vakuumdestillation kann Quecksilber zu einem 5-N-Metall gereinigt werden.
Antimon (Sb, Schmelztemperatur 630,5 °C, Dichte 6,69 g/cm^3) kommt in sulfidischer Bindung vor und wird durch Röstreduktionsarbeit gewonnen. Das beim Rösten entstehende Antimontrioxid wird im Schacht- oder Flammofen zu *Rohmetall* (75 bis 92 % Sb) verschmolzen. Seltener wird das Antimonsulfid durch Niederschlagsarbeit mit Eisen, wobei das schwefelaffinere Eisen den Schwefel abbindet, verarbeitet.
Rohantimon wird durch Umschmelzen unter einer Salzschlacke zu *Reinantimon* (99,5 bis 99,8 % Sb) raffiniert.
Durch Elektrolyseverfahren läßt sich Elektrolytantimon (99,999 % Sb) herstellen, daß durch weitere spezielle Reinigungsverfahren, wie Zonenschmelzen (vgl. 3.3.1.), bis auf die in der Halbleitertechnik benötigte hohe Reinheit von 99,9995 % Sb gebracht werden kann. Antimon wird darüber hinaus für Legierungszwecke (Hartblei, Lager- und Letternmetall) und in Form von anorganischen und organischen Verbindungen eingesetzt.
Kadmium (Cd, Schmelztemperatur 321 °C, Dichte 8,65 g/cm^3) fällt als Nebenprodukt bei der Zinkgewinnung (als kadmiumreicher Zinkstaub bei der trockenen Zinkgewinnung oder als Kadmiumschwamm mit 8 bis 25 % Cd bei der Laugenreinigung im Zuge der nassen Zinkgewinnung, vgl. Zink) an.
Nach Lösen und gegebenenfalls weiteren Reinigungsstufen wird Kadmium durch Reduktionselektrolyse an rotierenden, scheibenförmigen Aluminiumkatoden abgeschieden. *Elektrolytkadmium* besitzt eine Reinheit von 99,95 % Cd.
Kadmium wird für galvanische Überzüge, für Legierungen, in Akkumulatoren, in der Kerntechnik als Neutronenabsorber, in der Halbleiterindustrie sowie für die Farbenherstellung verwendet.
Wismut (Bi, Schmelztemperatur 271 °C, Dichte 9,8 g/cm^3) fällt vor allem bei der Blei- und Zinnproduktion an. Durch Auslaugen wismuthaltiger Zwischenprodukte mit Salzsäure und hydrolytische Spaltung erhält man Wismutoxychlorid (BiOCl), das mit Kalk und Kohlenstoff zu *Rohwismut* (90 bis 95 % Bi) verschmolzen wird. Durch trockene Raffinationsstufen erhält man *Reinwismut* (99,8 bis 99,9 % Bi), das durch elektrolytische Raffination bis auf 99,99 % Bi und weiter durch Destillation und Zonenschmelzen auf 99,999 % Bi (*Reinstwismut*) gereinigt werden kann.
Verwendet wird Wismut für niedrigschmelzende Legierungen, Schmelzsicherungen, Lotwerkstoffe, als Rohstoff für thermoelektrische Halbleiter und in Verbindungsform in der Pharmazie, Kosmetik-, Glas-, Email- und Farbenindustrie.

3.3.5. Metallurgie der Leichtmetalle

Aluminium (Al, Schmelztemperatur 660 °C, Dichte 2,7 g/cm^3) wird nahezu ausschließlich aus Bauxit gewonnen, wobei der Prozeß in die Aufbereitung (*a*), Herstellung der Tonerde auf naßmetallurgischem Wege (*b*) und elektrochemische Reduktion des Aluminiums durch Schmelzflußelektrolyse (*c*) untergliedert werden kann (Abb. 3.3.5-1).
Herstellung der Tonerde (reines Aluminiumoxid, Al_2O_3). Da Aluminium ein unedles Metall ist und bei seiner Reduktion die meist edleren Verunreinigungen mit reduziert werden würden, wäre die Raffination zu aufwendig bzw. technisch kaum lösbar. Die Hauptmenge des gegenwärtig eingesetzten Bauxits (≈ 90 %) wird deshalb nach dem *Bayer-Verfahren* verarbeitet. Der gemahlene und entwässerte Bauxit wird mit 40%iger Natronlauge angerührt und im Autoklaven bei Drücken bis zu 2 MPa und 160 bis 200 °C aufgeschlossen. Dabei geht das Aluminium in Lösung (*Aluminatlauge*), während die unlöslichen Bestandteile (hauptsächlich Eisenverbindungen) als sog. *Rotschlamm* zurückbleiben. Nach dem Entspannen und der Filtration wird aus der abgekühlten klaren Aluminatlauge unter Zuhilfenahme von Impfkristallen Aluminiumhydroxid ausgerührt. Das Hydroxid wird abfiltriert und im Drehrohrofen durch Kalzination in wasserfreies Aluminiumoxid umgewandelt, während die natronlaugehaltige Lösung zum Aufschluß zurückgeht.
Die *thermischen Reduktionsverfahren* werden entweder mit Kohlenstoff im geschlossenen Lichtbogenofen unter Normaldruck bei > 2000 °C oder mit Silizium (als Ferrosilizium mit 90 % Si) unter Vakuum in Retorten bei ≈ 1150 °C durchgeführt. Das Magnesium wird außerhalb des Reduktionsapparats kondensiert und zu Blöcken umgeschmolzen.
Titan (Ti, Schmelztemperatur 1668 °C, Dichte 4,5 g/cm^3) wird aus Rutil (TiO_2), Ilmenit ($FeTiO_3$) oder titanreichen Schlacken der Ilmenitreduktion über die Zwischenstufe Titantetrachlorid ($TiCl_4$) erzeugt. Die Chlorierung läuft unter reduzierenden Bedingungen und Zugabe eines Chlorierungsmittels (meist elemen-

tares Chlor) ab. Nach Reinigung des Titantetrachlorids erfolgt dessen Reduktion mit metallischem Magnesium (*Kroll-Verfahren*) oder Natrium bei 700°C unter Argonatmosphäre zu *Titanschwamm*.
Nach Verdampfen des restlichen Magnesiums und des Magnesiumchlorids wird der Titanschwamm zu Abschmelzelektroden verpreßt und im Lichtbogen- bzw. Elektronenstrahlofen zu Blocktitan verschmolzen. Titan hoher Reinheit kann man aus Titanschwamm durch einen chemischen Transportprozeß (Aufwachsverfahren, vgl. 3.3.1.) über Titantetrajodid (TiJ_4) erzeugen. Ferrotitan gewinnt man meist auf aluminothermischem Wege. *Titanweiß* (TiO_2) wird durch Hydrolyse von Titantetrachlorid und Kalzination des entstehenden Titanhydroxids erhalten.

3.3.6. Metallurgie der Stahlveredlungsmetalle

Eine Reihe von Metallen finden zwar wie Nickel und Titan als reine Metalle oder Legierungen mit anderen NE-Metallen breite Verwendung, hauptsächlich aber werden sie zur Stahlveredlung eingesetzt. Zu ihnen zählt man vor allem Chrom, Kobalt, Molybdän, Wolfram, Vanadin und Mangan. Zur Erzeugung von legierten Stählen werden sie in Form von Vorlegierungen (*Ferrolegierungen*) mit Eisen, also als Ferrochrom, -mangan, -nickel, -titan usw., eingesetzt, die im Elektro- oder auch Hochofen erschmolzen werden.

Chrom (Cr, Schmelztemperatur 1890 ± 20°C, Dichte 7,14 g/cm^3) wird überwiegend durch karbothermische Reduktion im Elektroofen aus oxidischen, eisenhaltigen Chromerzen in Form von *Ferrochrom* (65 bis 70% Cr) erzeugt. Reines metallisches Chrom gewinnt man durch metallothermische Reduktion mit Silizium (*silikothermisch* 98 bis 99% Cr) oder Aluminium (*aluminothermisch* > 99% Cr) von Chromoxid.
Elektrolytchrom kann aus reiner Chromalaunlösung katodisch abgeschieden werden. Das spröde Elektrolytchrom wird ebenso wie der durch Reduktion von Chromchlorid mit Magnesium erzeugte *Chromschwamm* pulvermetallurgisch oder durch Umschmelzen im Vakuumlichtbogen- bzw. Elektronenstrahlofen zu duktilem Chrom verarbeitet. Neben der Herstellung von Chromstählen, NE-Metallegierungen, Schneidwerkzeugen und Korrosionsschutzschichten (Verchromen) findet Chrom als chemische Verbindungen (Chromate), in der Keramikindustrie (Chromoxid) und bei der Druckplattenherstellung in der polygrafischen Industrie (vgl. 17.1.5.) Verwendung.

- Minderwertige, kieselsäurereiche Bauxite werden vor dem naßmetallurgischen Aufschluß im Drehrohrofen mit Kalk gesintert, um die störende Kieselsäure zur Vermeidung von Natronlaugeverlusten zu entfernen.

Aluminiumgewinnung aus Tonerde ist aufgrund des unedlen Charakters des Aluminiums durch Reduktion mit Kohlenstoff (zu hohe Temperaturen, Karbidbildung) auf ökonomisch vertretbare Weise nicht möglich. Deshalb muß die Reduktion mit Hilfe des elektrischen Stroms erfolgen. Die Elektrolyse kann nicht in wäßriger Lösung er-

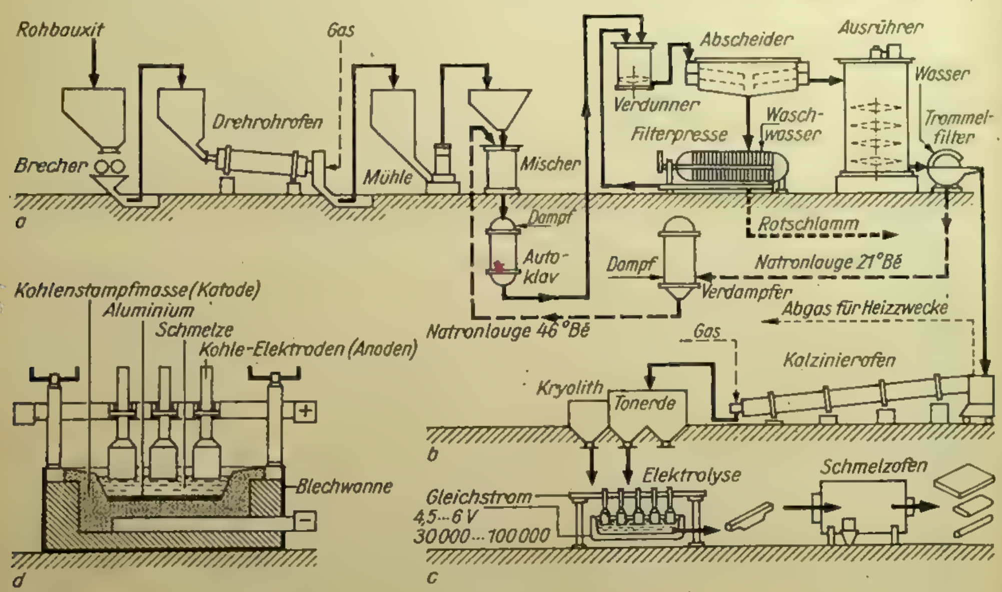


Abb. 3.3.5-1 a–c Aluminiumgewinnung. d Aluminiumelektrolysebad

folgen, da dabei nur Wasserstoff, aber nicht Aluminium abgeschieden würde, sondern nur in wasserfreien, aus geschmolzenen Salzen bestehenden Elektrolyten (*Schmelzflußelektrolyse*). Aus Elektrolysegefäß dient eine mit Kohlenstoff ausgekleidete Stahlwanne (Abb. 3.3.5-1d), die anfangs als Katode dient; später bildet das auf ihr abgeschiedene flüssige Aluminium die Katode. Die Anoden sind gebrannte Kohleblöcke oder selbstbrennende *Söderbergelektroden* (Elektrodenmasse wird kontinuierlich in die Blechummantelung der Anode gegeben). Der Elektrolyt besteht aus in *Kryolith* (Na_3AlF_6) gelöster Tonerde. Der Prozeß läuft bei ≈ 1000°C ab. Das katodisch abgeschiedene *Hüttenaluminium* (99,4 bis 99,8 % Al) wird periodisch aus dem Bad gesaugt und zu Masseln vergossen.

Für Spezialzwecke wird *Reinstaluminium* (99,99 % Al) durch elektrochemische Raffination im Schmelzfluß (*Dreischichtenelektrolyse*) erzeugt. Das Hüttenaluminium wird durch Kupferzusätze in der Dichte erhöht und bildet am Zellenboden die Anode, darüber befindet sich die Elektrolytschicht (Schmelze aus verschiedenen Fluoriden und Chloriden), auf der als Katode das Reinstaluminium schwimmt, das periodisch abgeschöpft wird.

Aluminiumschrott wird möglichst sortenrein unter Einbeziehung von Raffinationsstufen in der Legierungsproduktion eingesetzt.

Magnesium (Mg, Schmelztemperatur 650°C, Dichte 1,74 g/cm³) wird durch Schmelzflußelektrolyse oder durch karbo- bzw. metallothermische Reduktion gewonnen.

Die *Schmelzflußelektrolyse* benötigt als Ausgangsmaterial wasserfreies Magnesiumchlorid, das aus Magnesit, Dolomit, Carnallit, magnesiumchloridhaltigen Laugen oder aus dem Meerwasser gewonnen werden kann. Als Elektrolyt dient ein geschmolzenes Salzgemisch aus Natriumfluorid, Natrium-, Kalium-, Kalzium- und Magnesiumchlorid. Anoden- und Katodenraum sind durch eine halbdurchlässige Scheidewand (*Diaphragma*) getrennt. Bei einer Temperatur von ≈ 700°C wird an einer Stahlkatode Magnesium abgeschieden, das aufgrund seiner geringen Dichte zur Badoberfläche aufsteigt, während an der Graphitanode Chlorgas entsteht, das meist zur Magnesiumchloridgewinnung zurückgeht. Das erzeugte Magnesium hat einen Reinheitsgrad von 99,8 %.

Kobalt (Co, Schmelztemperatur 1495°C, Dichte 8,90 g/cm³) kommt nur selten als eigentliches Kobalterz (in arsenidischer Bindung) in der Natur vor, sondern wird hauptsächlich mit anderen NE-Metallen, wie Nickel, Kupfer, aber auch mit Blei, vergesellschaftet angetroffen. Nickel-Kobalt-Erze werden, wie auch kobalthaltige Zwischenprodukte der Blei- und Zinkgewinnung, einem Konzentrationsschmelzen zur Speise im Schacht- oder Flammofen unterzogen. Nach dem Abrösten der Speise zur Entfernung des Arsens erfolgt die Weiterverarbeitung auf hydrometallurgischem Wege. Das Röstgut wird mit Schwefelsäure gelaugt. Aus der Lauge wird nach einem umfangreichen Laugenreinigungsprozeß das Kobalt als Kobalthydroxid ($Co[OH]_3$) ausgefällt, während das Nickel in Lösung bleibt. Das Hydroxid wird zu Kobaltoxid verglüht. Kupferhaltige Kobalterze werden im Elektroofen zu einer Kobalt-Kupfer-Legierung reduziert, aus der nach Granulation mit Schwefelsäure das Kobalt ausgelaugt wird. Nach Fällung des $Co(OH)_3$ wird ebenfalls Kobaltoxid oder nach Lösen mit Schwefelsäure durch Reduktionselektrolyse Elektrolytkobalt mit 99,5 bis 99,7 % Co erzeugt. Kobaltmetall wird auch durch Reduktion des Oxids in Pulverform gewonnen.

Kobalt wird bei der Produktion von Stählen, in hochwarmfesten und Magnetlegierungen, in der Hartmetallproduktion, in Oxidform zur Herstellung von Kobaltfarben (Kobaltblau) und als radioaktives Isotop Co-60 in der Medizin (vgl. 12.4.8.) sowie zur Werkstoffprüfung (vgl. 13.3.2.) eingesetzt.

Mangan (Mn, Schmelztemperatur 1244°C, Dichte 7,43 g/cm³) wird aus oxidischen Manganerzkonzentraten gewonnen. Durch Reduktion im Hoch- oder Elektroofen wird *Ferromangan* unterschiedlicher Zusammensetzung (40 bis 90 % Mn) erzeugt. Reines *Manganmetall* wird dagegen durch metallothermische Reduktion mit Aluminium (96 bis 98 % Mn) oder Silizium (90 bis 95 % Mn) aus Braunstein (MnO_2) gewonnen. Das *Elektrolytmangan* (99,5 bis 99,7 % Mn) kann aus sorgfältig gereinigten schwefelsauren Mangansulfatlösungen durch Elektrolyse mit unlöslichen Anoden hergestellt werden. *Reinstmangan* (99,99 %) erhält man durch Vakuumverdampfung von technisch reinem Mangan.

Die Hauptmenge des Mangans wird zur Stahlveredlung verwendet, weitere Einsatzgebiete sind Sonderlegierungen mit Nickel, Kupfer, Aluminium und Magnesium sowie Manganverbindungen für die chemische Industrie.

Molybdän (Mo, Schmelztemperatur 2620 ± 10°C, Dichte 10,2 g/cm³) wird hauptsächlich aus Molybdänglanzkonzentraten (MoS_2) gewonnen. Dazu wird das Molybdändisulfid abgeröstet und das entstehende Molybdänoxid (MoO_3) mit Soda oder Ammoniak aufgeschlossen. Aus der Molybdatlösung erhält man durch Zersetzen mit Salzsäure reines Molybdänsäureanhydrit (MoO_3). Reines Molybdän wird durch Reduktion mit Wasserstoff erzeugt. Das dabei anfallende *Molybdänpulver* wird verpreßt, gesintert und durch Hämmern bei 1400 bis 1600°C zu Blech oder Draht verarbeitet.

Ferromolybdän wird aus Röstgut durch Reduktion mit Kohlenstoff oder Silizium im Lichtbogenofen erzeugt. Neben Ferromolybdän wird auch zu Ziegeln unter Pechzusatz verpreßtes

MoO_3 als Stahlveredler (Druckgefäße, Radachsen, Federn) eingesetzt. Außer diesem Hauptanwendungsgebiet (90%) wird Molybdän in Speziallegierungen, Magnetwerkstoffen, Heizelementen, Hartmetallen und in Sulfidform (MoS_2 als Schmiermittel) eingesetzt.
Wolfram (W, Schmelztemperatur 3 390 ± 10 °C, Dichte 19,3 g/cm^3) wird aus Konzentraten des Wolframits (Mischkristalle aus $FeWO_4$ und $MnWO_4$) oder Scheelits ($CaWO_4$) durch Aufschluß mit Soda oder Säuren in Wolframatlösungen überführt. Nach Ausfällen des Wolframsäureanhydrits (WO_3), das gegebenenfalls noch durch NH_4OH aufgelöst und umgefällt wird, erfolgt die Reduktion des Metalls mit Wasserstoff. Das entstehende *Wolframpulver* wird gepreßt, gesintert und durch Hämmern in duktiles Material (meist Draht) verwandelt. Größere Blöcke lassen sich auch durch Schmelzen von gesintertem Material im Vakuum erzeugen. *Ferrowolfram* wird aus Konzentraten im Lichtbogenofen bzw. alumino- oder silikothermisch erschmolzen.
Wolfram wird als Stahlveredler bzw. Bestandteil hochwarmfester Legierungen, Glühlampendraht, Röntgenanoden, Elektrodenwerkstoff, Heizleiter und Wolframkarbid (Schneidwerkstoff, Hartmetallbestandteil) verwendet.
Vanadin (V, Schmelztemperatur 1 890 °C, Dichte 6,12 g/cm^3) wird als Nebenbestandteil der Buntmetallgewinnung in Zwischenprodukten, wie Schlacken u. ä., angereichert und daraus durch thermischen Aufschluß mit Kochsalz oder Alkalien in wasserlösliche Natriumvanadate überführt. Aus der Lauge läßt sich Vanadinpentoxid (V_2O_5) ausfällen. Reines Vanadin läßt sich daraus durch metallothermische Reduktion mit Kalzium erzeugen. Duktiles Vanadin kann durch einen Aufwachsprozeß mit Jod gewonnen werden. *Ferrovanadin* und *-vanadinsilizium* werden auf alumino- bzw. silikothermischem Wege aus technischer Vanadinsäure hergestellt. Vanadin wird als Stickstoffbinder und Desoxydationsmittel in Stählen, als Karbidstabilisator in Schnellarbeitsstählen, in warmfesten Sonderlegierungen, als Röntgenfilter, in der Kerntechnik und als Vanadinpentoxidkatalysator verwendet.

3.3.7. Gewinnung Seltener Metalle und Elemente

Die NE-Metalle, die in Vorkommen und Verwendung mehr oder minder selten sind, durch ihre Eigenschaften bedingt aber in der modernen Technik spezielle Anwendung finden, werden als *Seltene Metalle* bezeichnet. Für ihre Gewinnung sind oftmals komplizierte Technologien erforderlich (vgl. 3.3.1.), zumal sie meist noch als Reinstmetalle benötigt werden. Unter der Bezeichnung *Spurenmetalle* faßt man solche Metalle zusammen, die gewöhnlich als isomorphe Beimengungen (im Kristallgitter anstelle anderer Atome eingebaut) in Buntmetallerzen als Spurenverunreinigung vorkommen. Zu ihnen werden Gallium, Germanium, Indium, Selen, Tellur und Thallium gezählt. Die Elemente Germanium, Silizium und Selen sowie die Verbindungen des Galliums und Indiums mit Antimon, Arsen, Phosphor und Stickstoff sind elektrisch halbleitend und finden als *Halbleiterwerkstoffe* in der modernen Elektronik breite Anwendung.
Beryllium (Be, Schmelztemperatur 1 283 °C, Dichte 1,82 g/cm^3) wird aus *Beryllkonzentraten* ($3\,BeO \cdot Al_2O_3 \cdot 6\,SiO_2$) durch Sinteraufschluß mit Natriumeisenfluorid bzw. -siliziumfluorid bei 750 °C oder durch Schmelzaufschluß bei 1 650 °C im Lichtbogenofen in lösliche Verbindungen überführt. Nach Naßmahlung und Reinigung der Lösung wird Berylliumhydroxid ausgefällt, das zu Berylliumoxid verglüht wird. Aus dem Oxid wird durch Chlorieren in Anwesenheit von Kohlenstoff bei 850 bis 900 °C Berylliumchlorid hergestellt, das als Ausgangsmaterial für die Erzeugung von Berylliummetallflittern (*Flakes*) mittels Schmelzflußelektrolyse dient. Durch Zusatz von Natriumchlorid beträgt die Temperatur nur 350 bis 400 °C. Die grobkristalline Abscheidung erfolgt an der als Katode ausgebildeten Gefäßwand. Eine weitere Möglichkeit bietet die metallothermische Reduktion von Berylliumfluorid mit Magnesium. Hierzu wird das Berylliumoxid zunächst in das Fluorid überführt, um im Anschluß daran bei ≈ 850 °C durch Magnesium reduziert zu werden. Nach Abschluß der Reaktion steigert man die Temperatur über die Schmelztemperatur des Berylliums, so daß es zu einem kompakten Block zusammenläuft.
Da ≈ $^2/_3$ der Berylliumproduktion zur Erzeugung von Berylliumbronze (2% Be) benötigt werden, wird die Hauptmenge des Metalls in Form einer Kupfer-Beryllium-Vorlegierung mit 4% Be erzeugt. Dies geschieht durch Reduktion von Berylliumoxid im Lichtbogenofen mit Kohlenstoff in Gegenwart von Kupfer bei 1 800 bis 2 000 °C.
Neben dem Einsatz in warmaushärtbaren Berylliumbronzen wird das Metall als Konstruktionswerkstoff in der Flugzeug- und Raumfahrtindustrie, in der Kerntechnik, als Gettermetall in der Elektronik und als Desoxydationsmittel eingesetzt.
Bei der Erzeugung, Be- und Verarbeitung von Beryllium und Berylliumverbindungen ist ihrer außerordentlichen Giftigkeit Rechnung zu tragen.
Bor (B, Schmelztemperatur 2 300 °C, Dichte 2,33 g/cm^3) wird aus natürlich vorkommenden Boraten der Alkali- oder Erdalkalimetalle, meist über das Zwischenprodukt Borsäure (H_3BO_3), durch Schmelzflußelektrolyse, Reduktion mit Wasserstoff oder Magnesium gewonnen. Für die Schmelzflußelektrolyse dient Kaliumfluorborat

(KBF_4) in Kaliumchlorid bei 650 bis 1 000 °C als Ausgangsmaterial. Bei der Reduktion mit Wasserstoff wird Borchlorid (BCl_3) bei Temperaturen über 1 000 °C an einem erhitzten Wolframdraht abgeschieden. Die Reduktion mittels Magnesium läuft in Kohletiegeln ab.
Bor wird als Legierungsbestandteil, in der Kerntechnik, als Kornfeinungsmittel, Desoxydationsmittel, Dotierungsmaterial in der Halbleitertechnik und wegen der Härte und Temperaturbeständigkeit in Form von Borkarbid und Bornitrid verwendet.
Zäsium (Cs, Schmelztemperatur 28,7 °C, Dichte 1,89 g/cm^3) wird durch Säure- bzw. Sinteraufschluß aus Mineralen (Polluzit, Lepidolith) mit geringen Zäsiumbeimengungen oder aus Carnallitmutterlaugen gewonnen.
Nach Fällung als Molybdatosilikat und weiteren Reinigungsstufen erhält man Zäsiumchlorid, aus dem metallisches Zäsium durch metallothermische Reduktion oder Schmelzflußelektrolyse hergestellt werden kann. Das Isotop Cs-137 kann durch Aufarbeitung von Reaktorabfällen erhalten werden. Das Metall findet vor allem in der Elektronik (Senderöhren, Ikonoskope, Zäsiumdampffüllung in Röhren) Verwendung.
Gallium (Ga, Schmelztemperatur 29,8 °C, Dichte 5,91 g/cm^3) kommt als Verunreinigung in geringen Konzentrationen in Buntmetallerzen (Bauxit, Zinkblende) vor und wird aus Zwischenprodukten, in denen es sich anreichert, gewonnen. Gewöhnlich wird an einer galliumhaltigen Natriumaluminatlauge das Gallium als Hydroxidgemisch [mit $Al(OH)_3$] gefällt oder durch Amalgamelektrolyse abgeschieden. Nach mehreren Reinigungsstufen erhält man reines Galliumhydroxid, das der elektrolytischen Galliumgewinnung vorausgeht, indem es in Natriumhydroxid aufgelöst wird. Das abgeschiedene flüssige Gallium enthält immer noch Natrium, das durch Waschen mit Säuren entfernt wird.
Gallium wird in der Halbleitertechnik (Galliumantimonid, -arsenid, -phosphid), für Thermometer, als Wärmeübertragungsmittel in Kernreaktoren (weniger gut geeignet als Natrium) und für tiefschmelzende Legierungen verwendet.
Germanium (Ge, Schmelztemperatur 958,5 °C, Dichte 5,32 g/cm^3) kommt in einigen seltenen Mineralen sowie als Spurenelement in Kupfer-, Blei-, Zink-, Zinn-, Eisen- und Silbererzen sowie in der Kohle und im Erdöl vor. Durch den Aufschluß von Erzen oder Anreicherungsprodukten, wie Flugstäuben und -aschen, gewinnt man nach entsprechenden Destillationsprozessen Germaniumtetrachlorid ($GeCl_4$), aus dem durch Hydrolyse Germaniumdioxid (GeO_2) hergestellt wird. Durch Reduktion des Oxids mit Wasserstoff bei ≈ 650 °C erhält man Germaniumpulver, das gegen Ende der Reduktion durch kurzfristiges Erhitzen auf 1 100 °C zu einem festen Regulus verschmolzen wird. Die weitere Reinigung erfolgt durch Zonenschmelzen. Aus dem hochreinen, zonengeschmolzenen Germanium werden schließlich für die Belange der Halbleiterindustrie Einkristalle gezogen (vgl. 3.3.1.).
Germanium wird vor allem in der Halbleiterelektronik als Dioden- und Transistorenmaterial, seltener als Legierungselement, eingesetzt.
Hafnium (Hf, Schmelztemperatur 2215 ± 5 °C, Dichte 13,3 g/cm^3) kommt aufgrund der Ähnlichkeit mit Zirkonium in jedem Zirkoniummineral als Beimengung vor und wird im Zuge der Zirkoniumherstellung gewonnen. Die enge Verwandtschaft beider Metalle bedingt ähnliche chemische Eigenschaften, so daß die Trennung nur durch spezielle Verfahren, wie fraktionierte Kristallisation, Ionenaustausch und Lösungsmittelextraktion, möglich ist. Im Ergebnis der Trennverfahren erhaltenes Hafniumoxid wird durch Chlorierung bei 600 bis 800 °C in Hafniumtetrachlorid umgewandelt, das nach Sublimation mittels Magnesium zu Hafniumschwamm reduziert werden kann. Der Schwamm wird im Elektronenstrahlofen zu Blöcken verschmolzen. Hochreines Hafnium kann man nach dem Jodidverfahren an Wolfram bei 1 600 °C niederschlagen.
Hafnium wird als Material für Kontroll- und Regelstäbe in Kernreaktoren, als korrosionsfester Werkstoff, als Katode oder Getterwerkstoff in der Elektronik bzw. in Karbidform als Hochtemperaturwerkstoff verwendet.
Indium (In, Schmelztemperatur 156,4 °C, Dichte 7,30 g/cm^3) kommt weder gediegen noch in eigenen Mineralen vor, sondern ist als Spurenelement in Zink-, Zinn- und Bleierzen zu finden. Bei der Zink- oder Kadmiumherstellung wird Indium in einem Flugstaub o. a. Zwischenprodukt angereichert. Durch Lösen in Säuren wird Indium mit anderen Metallen in Lösung gebracht und nach entsprechenden Reinigungsstufen durch Zementation mit Zink ein Indiumschwamm erzeugt. Das Rohindium wird durch Schmelzraffination bzw. Elektrolyse gereinigt. Reinstindium ist durch mehrfache Elektrolyse gewinnbar.
Indium wird als Grundwerkstoff für Halbleiterbauelemente (Indiumantimonid, -arsenid, -phosphid), als Bestandteil tiefschmelzender Legierungen, als Verschleißschutzschicht von Gleitlagern und für Weichlote eingesetzt.
Lithium (Li, Schmelztemperatur 180 °C, Dichte 0,53 g/cm^3) kommt in der Erdrinde häufig vor und bildet silikatische Erze. Lithiumkonzentrate werden entweder mit Schwefelsäure bei 850 bis 900 °C oder mit Kalk und Kalziumsulfat bei 1 100 °C aufgeschlossen und ihr Lithiumgehalt in wasserlösliches Lithiumsulfat überführt. Nach Reinigung der Lösung wird Lithiumkarbonat ausgefällt. Metallisches Lithium wird durch Schmelzflußelektrolyse eines Gemischs von Lithium- und Kaliumchlorid bei 450 bis 550 °C gewonnen.

Das Umschmelzen muß unter Paraffin erfolgen. Lithium wird als Desoxydationsmittel in der NE-Metallindustrie, in der Kerntechnik, für die Schmiermittelproduktion, in der Glas- und Keramikindustrie, als Legierungsbestandteil, in der Pharmazie und Raketentechnik benötigt.

Niob (Nb, Schmelztemperatur 2468°C, Dichte 8,58 g/cm³) ist mit dem Tantal nahe verwandt und kommt oft mit Wolfram-, Zinn- und Zirkoniummineralen gemeinsam vor. Durch Aufschluß der Niob-Tantal-Konzentrate oder des Ferroniobs mit Kaliumhydrogensulfat, Natriumhydroxid, Fluß- oder Schwefelsäure bzw. durch Chlorierung wird in einem mehrstufigen Prozeß zunächst ein Gemisch der Pentoxide des Niobs (Nb_2O_5) und Tantals (Ta_2O_5) gewonnen. Die Niob-Tantal-Trennung geschieht durch fraktionierte Kristallisation der Kaliumdoppelfluoride oder durch Lösungsmittelextraktion. Metallisches Niob wird durch Reduktion des Kaliumniobfluorids mit Natrium bzw. durch thermische Zersetzung nach einem modifizierten van Arkel-Verfahren erzeugt. Auch durch Reaktionen von Niobpentoxid und Niobcarbid kann Niobmetall hergestellt werden. Für Legierungszwecke in der Stahlindustrie wird Ferroniob eingesetzt, das durch elektro- bzw. aluminothermische Reduktion von Niobkonzentrat gewonnen werden kann.

Duktiles Niob wird pulvermetallurgisch oder durch Schmelzen im Elektronenstrahl erzeugt.

Verwendet wird Niob in der Kerntechnik, Raum- und Luftfahrtindustrie, als Stahlveredler für hochwarmfeste und beständige Stähle, für Hartmetallegierungen und in der Hochvakuumtechnik.

Rhenium (Re, Schmelztemperatur 3180°C, Dichte 21,04 g/cm³) kommt als Beimengung in Molybdänerzen bzw. molybdänhaltigen Kupfererzen vor und reichert sich in Zwischenprodukten, wie Flugstäuben oder Laugen, an. Durch Laugung der Flugstäube und Entfernung störender Verunreinigungen erzeugt man i. allg. ein Kaliumperrhenat ($KReO_4$), aus dem metallisches Rhenium durch Reduktion mit Wasserstoff gewonnen werden kann. Aus dem so erzeugten Pulver kann durch Pressen und Sintern kompaktes Rheniummetall erzeugt werden. Verwendet wird Rhenium als Austauschwerkstoff für Osmium und Iridium in Schreibfederspitzen und Kompaßnadeln, für Glühfäden in Elektronenröhren, Hochtemperaturthermopaare, als Katalysator sowie als Hochtemperaturwerkstoff in reduzierender Atmosphäre, da es keine Karbide bildet.

Rubidium (Ru, Schmelztemperatur 38,8 ± 1°C, Dichte 1,53 g/cm³) bildet keine eigenen Erze, kommt aber als Beimengung in verschiedenen Mineralen und Solquellen vor. Gewonnen wird es aus carnallitischen Rohsalzen durch vielfache Umkristallisation und Fällung als Rubidiumsilikomolybdat bzw. durch Ionenaustauschverfahren. Das Metall erhält man durch metallothermische Reduktion seiner Salze, wobei Rubidium abdestilliert und an kalten Stellen der Apparatur niedergeschlagen wird. Rubidium wird wegen der hohen Affinität zu Sauerstoff als Gettermetall für Elektronenröhren, zur Herstellung von Fotozellen, als Katalysatorbestandteil und in verschiedenen Verbindungen für medizinische Zwecke verwendet.

Selen (Se, Schmelztemperatur 217,4°C, Dichte 4,81 g/cm³) kommt in ≈ 25 Mineralen vor, aus denen es aber wegen der geringen Gehalte bzw. der zu kleinen Vorkommen nicht gewonnen werden kann. Die Selengewinnung erfolgt aus Blei-, Kupfer-, Nickel- und Zinkerzen, in denen es aufgrund seiner Verwandtschaft zum Schwefel als Beimengung vorkommt. Ausgangsmaterial für die Erzeugung des Selens sind vor allem der Anodenschlamm der Kupferraffinationselektrolyse und die Schlämme aus den Waschtürmen der Schwefelsäureproduktion. Durch Rösten mit Soda und anschließende Wasserlaugung bzw. durch Rösten und wäßrigen Aufschluß mit Natronlauge wird das Selen als Natriumselenit, z. T. auch als Natriumselenat, in Lösung gebracht. Durch Neutralisation der reinen Lösung mit Salz- oder Schwefelsäure erfolgt die Reduktion zum elementaren Selen mit Schwefeldioxid. Das Rohselen (≈ 97,5% Se) wird durch Schmelzen mit NaOH oder durch Destillation gereinigt. Durch teilweise mehrmalige Destillation erreicht man die für Gleichrichterzwecke benötigte Reinheit.

Haupteinsatzgebiet für Selen sind die Elektrotechnik und Elektronik, die für Gleichrichter, Fotozellen und Halbleiterbauelemente das Element in großem Maße benötigen. Darüber hinaus wird es in der Glas- und Keramikindustrie als Färbe- und Entfärbungsmittel sowie für die Farbstoffproduktion verwendet.

Silizium (Si, Schmelztemperatur 1415 ± 10°C, Dichte 2,33 g/cm³) ist im eigentlichen Sinne kein Metall, sondern nimmt als Metalloid eine Zwischenstellung ein. Aufgrund seiner Bedeutung für die Metallurgie und die Halbleitertechnik soll auf seine Gewinnungsverfahren kurz eingegangen werden. Silizium ist das nach dem Sauerstoff am häufigsten am Aufbau der Erdrinde beteiligte Element, kommt aber nur in Verbindungen in Form von Siliziumdioxid (SiO_2) oder Silikaten vor. Durch karbothermische Reduktion im Elektroofen kann Silizium nur bis zu einer Reinheit von 99% erzeugt werden. Das Verfahren dient der Herstellung von Ferrosilizium und anderen Desoxydationsmitteln. Reinstsilizium wird durch metallothermische Reduktion von reinem Siliziumdioxid, durch Reduktion von Siliziumhalogeniden mit Wasserstoff, durch thermische Zersetzung von Siliziumhalogeniden an Wolframdrähten oder Silizium bzw. Zersetzung von Monosilan (SiH_4) gewonnen. Für Halbleiter-

zwecke erfolgt die weitere Reinigung durch Zonenfloating und Einkristallzüchtung (vgl. 3.3.1.). Neben der Verwendung als Halbleitergrundmaterial wird Silizium vor allem als Legierungselement in der Stahl- und NE-Metallindustrie, als Desoxydationsmittel, als Grundstoff für Silikonkunststoffe und als feuerfester Werkstoff in Form von Siliziumkarbid eingesetzt.

Tantal (Ta, Schmelztemperatur 2998 ± 2 °C, Dichte 16,6 g/cm^3) wird mit Niob gemeinsam aus Niob-Tantal-Konzentraten gewonnen. Durch Flüssig-Flüssig-Extraktion oder fraktionierte Kristallisation trennt man das Tantal in Form des Kaliumtantalfluorids vom Niob. Durch Reduktion mit Natrium oder durch Schmelzflußelektrolyse bzw. durch Reaktion von Tantalpentoxid mit Tantalkarbid erhält man Tantalpulver, das auf pulvermetallurgischem Wege oder durch Schmelzen im Elektronenstrahlofen in kompaktes Metall verwandelt wird.

Tantal dient als Wärmeüberträger im Apparatebau, Werkstoff für Gleichrichter und Kondensatoren, Gettermetall und Elektrodenwerkstoff in Elektronenröhren, als Werkstoff in der Kerntechnik sowie Legierungsmetall für die Stahlindustrie und hochtemperaturbeanspruchte Werkstoffe.

Thallium (Tl, Schmelztemperatur 303 ± 0,5 °C, Dichte 11,85 g/cm^3) kommt als Spurenelement in Schwermetallerzen vor und reichert sich in Flugstäuben bei der Pyrit-, Blei-, Kupfer- und Zinkerzverhüttung an. Durch Laugen und Zementation mit Zinkstaub oder Zinkamalgam erhält man Rohthallium, aus dem durch Amalgamelektrolyse Reinstthallium (99,999 % Tl) gewonnen werden kann. Thallium wird als den Korrosionswiderstand erhöhender Legierungsbestandteil, als Flüssigkeit für Tieftemperaturthermometer in Verbindung mit Quecksilber, in Verbindungsform als fotoempfindlicher Halbleiterwerkstoff, in der Glasindustrie und wegen seiner hohen Giftwirkung als geruch- und geschmackloses Schädlingsbekämpfungsmittel verwendet.

Tellur (Te, Schmelztemperatur 449,5 °C, Dichte 6,25 g/cm^3) ist ein ausgesprochenes Spurenelement und seltener als Selen; oft ist es an Gold und Silber gebunden. Gegenwärtig wird Tellur hauptsächlich aus den Anodenschlämmen der Kupferelektrolyse gewonnen. Beim Rösten des Anodenschlamms wird Tellur im Gegensatz zu Selen nicht verflüchtigt, sondern verbleibt im Röstgut. Beim Verschmelzen mit Natriumhydroxid und Salpeter wird es in wasserlösliche Form überführt. Durch Ansäuern wird Tellurdioxid (TeO_2) ausgefällt. Metallisches Tellur wird durch Reduktion mit Mehl als Reduktionsmittel unter einer Boraxdecke, durch Lösen in Schwefelsäure und Fällung mit Schwefeldioxid oder durch Lösen in Natriumhydroxid mit anschließender Elektrolyse erzeugt. Hochreines Tellur kann daraus durch Vakuumdestillation oder Zonenschmelzen erhalten werden (vgl. 3.3.1).

Verwendet wird Tellur als Mikrolegierungsbestandteil im Stahl, zur Oberflächenhärtung von Verschleißteilen, als Legierungsbestandteil für Blei und Kupfer und vor allem als Bestandteil von halbleitenden Verbindungen für die Elektronik.

Uran (U, Schmelztemperatur 1130 °C, Dichte 19,10 g/cm^3) ist allgegenwärtig, bildet aber auch Lagerstätten seiner Minerale (Pechblende, Uraninit, Carnotit u. a.). Die zerkleinerten Erze werden je nach Gangart mit Schwefelsäure oder Sodalösung gelaugt, wobei das Uran als komplexes Uranylion in Lösung geht. Die Abtrennung des Metalls erfolgt durch Ionenaustauschverfahren, seltener durch Flüssig-Flüssig-Extraktion. Nach Elution (vgl. 3.3.1.) mit einer Kochsalzlösung wird das Metall mit Ammoniak, Natronlauge oder Magnesiumoxid als Ammonium-, Natrium- bzw. Magnesiumdiuranat gefällt. Durch Zersetzung der Fällprodukte gewinnt man Urantrioxid (UO_3), das durch Reduktion mit Wasserstoff zum Urandioxid (UO_2) umgewandelt wird. Uranmetall kann durch Reduktion mit Kohlenstoff oder Kalzium bzw. durch Umsetzung zu Urantetrafluorid und dessen Reduktion mit Kalzium hergestellt werden.

Für Reaktorbrennelemente wird Uran in metallischer Form mit dem angereicherten Isotop U-235 oder als gesintertes Urandioxid eingesetzt. Außer in der Kern- und Isotopentechnik wird Uran in Verbindungsform in der Glas- und Keramikindustrie als Farbstoff verwendet.

Zirkonium (Zr, Schmelztemperatur 1855 ± 3 °C, Dichte 6,50 g/cm^3) kommt in der Natur als Mineral Zirkon ($ZrSiO_4$) vor. Der Aufschluß erfolgt durch direkte Chlorierung bzw. durch Chlorierung des durch Reduktion im Lichtbogenofen erzeugten Zirkoniumkarbids. Das entstehende Zirkoniumtetrachlorid wird mit Magnesium zu Zirkoniumschwamm reduziert. Das technisch reine Zirkonium enthält 2 bis 2,5 % Hafnium. Die Gewinnung ist auch durch Sinterung mit Kaliumsiliziumfluorid und anschließende Fällung des Zirkoniumhydroxids möglich, das zu Zirkoniumdioxid verglüht wird.

Reaktorreines Zirkonium muß frei von Hafnium sein, so daß die Trennung beider Metalle vorgenommen werden muß. Hierzu eignen sich fraktionierte Kristallisation, Lösungsmittelextraktion und Ionenaustauschverfahren. Kompaktes Zirkoniummetall wird durch Schmelzen im Vakuumlichtbogenofen erzeugt. Zirkonium dient als Hüllenmaterial für Brennelemente, Bauteil von Vakuumröhren, Legierungsbestandteil, Desoxydations- und Kornfeinungsmittel und in Verbindungen (Zirkoniumdioxid, Zirkoniumborid, Zirkoniumnitrid, Zirkoniumsilikat) als feuerfester Werkstoff.

3.4. Pulvermetallurgie

Als Pulvermetallurgie werden zusammenfassend metallurgische Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen und Fertigteilen aus Pulvern von Metallen oder Metallverbindungen, gegebenenfalls auch unter Zusatz nichtmetallischer Bestandteile, bezeichnet. Zu den Verfahren gehören die Erzeugung und Formgebung der Pulver, eine Wärmebehandlung (Sintern) und die Nachbehandlung der Formteile.

3.4.1. Herstellung metallischer Pulver

Aus spezifischen legierungs- und verarbeitungstechnischen Gründen werden benötigt: *unlegierte Pulver*, die lediglich aus einem Element, z. B. Kupfer, bestehen, *vor-* und *anlegierte Pulver*, die durch Verarbeitung von Legierungen gewonnen werden, *Mischpulver* als binäre und ternäre Pulvermischungen unlegierter Pulver, wie z. B. Eisen und Kupfer oder Eisen und Nickel, und *Pulver für Sonderzwecke*, z. B. *Getter-*, *Schweiß-*, *Farbpulver* u. a.

Physikalische Verfahren. Die Zerkleinerung von festen Stoffen zu Pulvern wird sowohl bei metallischen als auch nichtmetallischen Werkstoffen angewendet. Neben spröden Stoffen, die sich besonders günstig zerkleinern lassen, können auch plastische Metalle, wie z. B. Kupfer oder Aluminium, zu Pulvern verarbeitet werden. Verwendet werden dazu *Hammer-*, *Kugel-*, *Schwing-* oder *Strahlmühlen* bzw. für

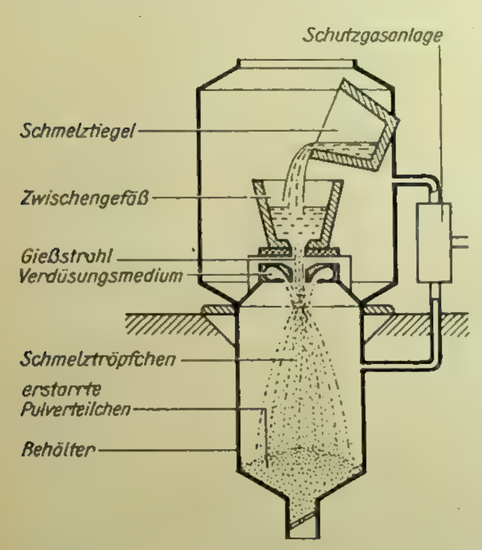


Abb. 3.4.1-1 Pulverherstellung durch Verdüsen einer Schmelze

Feinstpulver der *Attritor*, bei dem sich das Mahlgut in einem zylindrischen Behälter befindet, in dem die waagerechten Rührarme an einer senkrechten Welle rotieren. Schmelzflüssige Stoffe werden granuliert, zerstäubt, verspritzt oder verdüst. Das Verdüsen schmelzflüssiger Stoffe (Abb. 3.4.1-1) erlaubt die Herstellung größerer Pulvermengen in kürzeren Zeiten.

Zur großtechnischen Produktion sind folgende Verfahrensvarianten geeignet: *Druckwasserverdüsung* von Schmelzen an Luft oder unter Schutzgas, *Druckverdüsung* mit inerten Gasen, wie z. B. Argon oder Stickstoff, *Vakuumzerteilung* von mit Wasserstoff beladenen Schmelzen und *mechanische Zerteilung* eines schmelzflüssigen Gießstrahls durch die Zentrifugalkraft eines rotierenden Drehtellers unter Schutzgas. Zum Teil werden auch rotierende selbstverzehrende Elektroden, rotierende Saugheber u. a. dazu eingesetzt. Zu den physikalischen Verfahren zählt auch das *Verdampfen* eines festen Stoffs mit anschließender *Kondensation* zu Pulver, das bei Metallen, wie z. B. Zink, anwendbar ist.

Chemische Verfahren. Hierzu gehören u. a. das Karbonylverfahren, die Reduktion von Oxiden, die Mischfällungen, die Pulverherstellung durch interkristalline Korrosion, die Erzeugung von Pulvern aus intermetallischen oder -mediären Verbindungen, Ausfällungsprozesse (Zementationsverfahren) und die Elektrolyse.

Beim *Karbonylverfahren* bilden Metalle, wie Eisen, Nickel, Kobalt, Wolfram, Molybdän und Chrom, bei hohem Druck mit Kohlenmonoxid komplexe Verbindungen. Eisen wird z. B. mit CO-Gas unter hohem Druck bei ≈ 200 °C in das Eisenkarbonyl $[Fe(CO)_5]$ überführt, einer Flüssigkeit, die unter Atmosphärendruck bei 103 °C siedet. Bei höheren Temperaturen zerfällt es zu Eisen und Kohlenmonoxid, wobei ein Eisenpulver mit kugeligen Teilchen von 0,5 bis 1 μm Durchmesser anfällt.

Bei der *nassen Reduktion* können z. B. Eisenschrott oder Erze zu hochwertigem Eisenpulver verarbeitet werden. Als Lösungsmittel wird Salzsäure verwendet. Die entstandene Eisenchloridlösung wird gefiltert, verdampft, kristallisiert und zentrifugiert. Nach dem Trocknen wird das Eisenchlorid mit Wasserstoff reduziert. Wasserstoff bzw. Salzsäure werden dem Kreislauf wieder zugeführt und müssen von Zeit zu Zeit erneuert bzw. kontinuierlich ergänzt werden.

Auch Nickel-, Kobalt- oder Kupferpulver können aus einer wäßrigen ammoniakalischen Lösung des jeweiligen Metallsalzes durch Reduktion mit Wasserstoff unter Druck hergestellt werden (*Druckreduktion*). Die Metallsalzlösungen kann man durch Verfahren der *Hydrometallurgie* (z. B. *Drucklaugen*) aus Erzen mit geringem Metallgehalt oder aus Sekundärrohstoffen erzeugen.

Bei der *trockenen Reduktion* werden oxidische Erze, z. B. Magnetit, im feingemahlenen Zu-

stand durch zugesetzten Kohlenstoff oder durch ein reduzierendes Gas (Wasserstoff, konvertiertes Erdgas) bei Temperaturen um 1000 °C ohne Auftreten einer Schmelze in Eisenschwamm überführt, der dann zu Pulver gemahlen wird.

3.4.2. Nachbehandlung und Aufbereitung der Metallpulver

Die Erzeugungsverfahren liefern zunächst ein *Rohpulver*, das dem Einsatzzweck entsprechend aufbereitet werden muß. Die einzelnen Verfahren haben dabei das Ziel, die Pulver zur Einstellung spezieller Korngrößen zu *mahlen*, durch Sieben oder Schlämmen zu *klassieren*; verschiedene Korngrößen, Werkstoffe oder Kornformen zu *mischen* und magnetische von nichtmagnetischen Werkstoffen zu *trennen*. Gegebenenfalls werden die Pulver zur Beseitigung einer Kaltverfestigung, Härtung oder Oxydation in neutraler oder reduzierender Atmosphäre einer Wärmebehandlung unterzogen.
Der mittlere Durchmesser der Pulver liegt zwischen 0,1 bis 0,5 mm, bei Feinstpulver auch < 0,1 mm.

3.4.3. Formgebung metallischer Pulver

Die Pulver müssen durch das Formgebungsverfahren
– in die gewünschte geometrische Form gebracht werden,
– eine für die anschließende Wärmebehandlung notwendige gleichmäßige Dichte und Porosität bekommen und
– eine für die nachfolgenden Arbeitsgänge ausreichende mechanische Festigkeit erhalten.
Zur Formgebung bei Raumtemperatur rechnet man das Verdichten ohne zusätzliche Druckwirkung, wie z. B. das *Schlickergießen*, die Verdichtung durch Schwerkraft, die *Vibrationsverdichtung* und das *Pasteverfahren*. Zur Formgebung mit zusätzlicher Druckwirkung bei Raumtemperatur zählt man das *Kaltpressen*, das *Kaltwalzen*, das *Strangpressen* und bestimmte Sonderverfahren, z. B. das *isostatische Pressen*. Zu den Formgebungsverfahren bei erhöhten Temperaturen, die grundsätzlich mit zusätzlichem Druck wirken, gehören u. a. das *Heißpressen* (auch das isostatische Heißpressen), das *Pulverschmieden*, das *Warmwalzen* (Abb. 3.4.3-1). Die Formgebung metallischer Pulver bei erhöhten Temperaturen bietet den Vorteil geringerer Verdichtungsdrücke und erlaubt es, hohe Werkstoffdichten zu erreichen. Der Nachteil besteht jedoch darin, daß warm- und zunderfeste Werkzeuge verwendet werden müssen und infolge der höheren Oxydationsempfindlichkeit der Pulver unter Schutzgas oder im Vakuum gearbeitet werden muß. Da infolge höherer Temperaturen während der Verdichtung

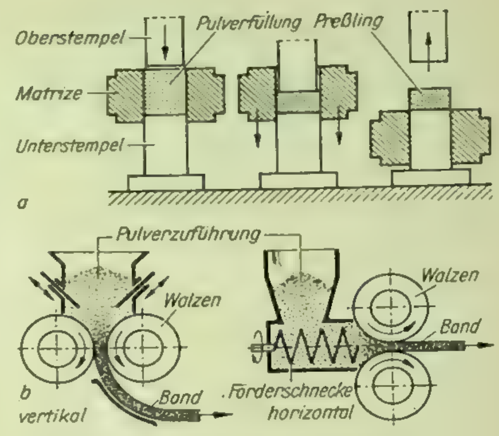


Abb. 3.4.3-1 Verfahren zur Formgebung metallischer Pulver: a Pressen, b Walzen

auch Sinterprozesse ablaufen (*Drucksintern*), erlangen diese Prozesse durch die mögliche Einsparung oder wesentliche Verkürzung des Sinterprozesses besondere technische und ökonomische Bedeutung.
Schlickergießen erlaubt die Herstellung kompliziert geformter Teile. Der wäßrige Schlicker besteht aus Metallpulver und quellfähigen, beim Sintern leicht entfernbaren Zusätzen. Er füllt beim Gießen die im Abdruckverfahren aus Gips hergestellte Form leicht aus.
Pressen. Der überwiegende Teil der Metallpulver wird durch *Pressen* zu Formteilen bei Drücken bis 10^3 MPa verarbeitet. Die *Preßwerkzeuge* müssen so beschaffen sein, daß die *Matrize* und der *Stempel* der Form des herzustellenden Werkstücks entsprechen. Sie werden stark beansprucht und deshalb aus hochwertigem Stahl oder Hartmetall gefertigt. Da ihre Herstellung teuer ist, wird eine pulvermetallurgische Erzeugung von Formteilen erst ökonomisch, wenn eine Mindestanzahl erzeugt werden kann (je nach Gestaltung > 10^4 Stück). Zur Vermeidung eines hohen Werkzeugverschleißes und zur Verbesserung der Preßbarkeit wird dem Pulver ein Gleitmittel, z. B. Stearat oder Graphit, zugesetzt. Wesentlich ist, daß bei der konstruktiven Gestaltung der Formteile beachtet werden muß, daß sich jedes Teil aus einzelnen preßtechnisch herstellbaren Grundkörpern aufbauen lassen muß, da die Metallpulver nur beschränkt fließen und ausschließlich in Preßrichtung verdichtet werden können (Abb. 3.4.3-2, Tafel 15).
Kaltpressen erfolgt bei Raumtemperatur und erlaubt je nach Höhe des Preßdrucks die Herstellung von Teilen mit unterschiedlicher Porosität.
Heißpressen bei höheren Temperaturen gestattet dagegen nahezu porenfreie Werkstücke zu pro-

duzieren. Das Grundprinzip des Preßverfahrens mit den Prozeßstufen zeigt Abb. 3.4.3-3. Alle anderen Verfahren sind Modifikationen dieses Grundprinzips. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl der Preß- und Sinterstufen bzw. nachfolgende *Kalibrierung* (Genaupreßstufe) oder dem *Tränken (Infiltrieren)* der porigen Struktur mit Öl oder speziellen Legierungen (vgl. 3.4.4.).

Beim *isostatischen Pressen* wird das Pulver in eine flexible Hülle gefüllt und diese dann einem allseitig wirkenden Gas- oder Flüssigkeitsdruck ausgesetzt. Beim *isostatischen Heißpressen* wird das Metallpulver zusätzlich auf höhere Temperaturen erwärmt, so daß das Pulver nicht nur verdichtet, sondern auch gesintert wird. Mit diesem Verfahren können sehr große Teile erzeugt werden (Stückmassen $> 10^3$ kg).

Walzen. Beim Walzen werden die Pulver zwischen 2 Walzen bei Raumtemperatur oder auch bei höheren Temperaturen verdichtet. Die Walzverdichtung kann vertikal und horizontal erfolgen (↑ Abb. 3.4.3-1b). Für die Zuführung der Pulver zum Walzspalt sind besondere Pulverzufuhreinrichtungen erforderlich, z. B. Schneckenförderer bei horizontaler Walzverdichtung.

Alle entwickelten Verfahren reduzieren sich auf die prinzipiellen Prozeßstufen: *Verdichten* bzw. *Formieren* der Pulver zu einem Band, dem *Grünband*, *Sintern* des Grünbands zu einem durch Weiterverarbeitungsprozesse mechanisch belastbaren *Rohband*, weitere Verdichtung des Rohbands durch *Warm-* und/oder *Kaltwalzen*,

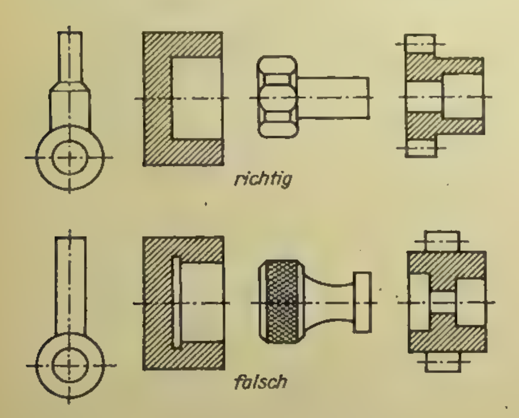


Abb. 3.4.3-2 Zweckmäßige Gestaltung von Formteilen aus Sinterwerkstoffen

Zwischen- und *Schlußglühbehandlungen*, Nachbehandlungen. Je nach dem angestrebten Erzeugnis lassen sich Bänder herstellen, die gleichartige Eigenschaften wie schmelzmetallurgische Bänder aufweisen bzw. auch Bänder mit besonderen Eigenschaften produzieren, z. B. poröse Filterbänder, Mehrschichtbänder u. a.

Pulverschmieden. Mit diesem Verfahren werden Werkstoffdichten (>99 %), Festigkeiten und

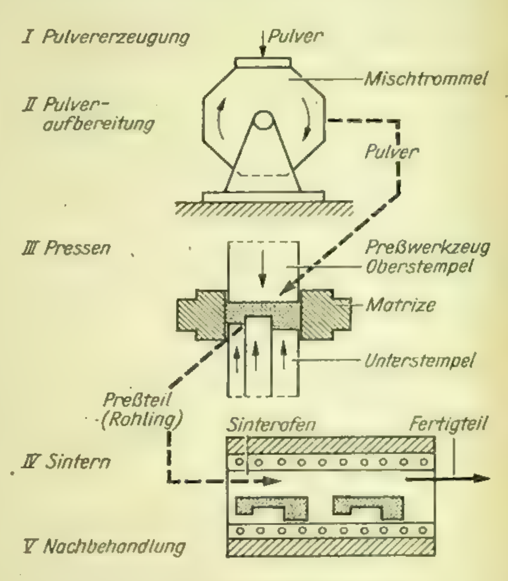


Abb. 3.4.3-3 Verfahrensschritte zur Herstellung von Formteilen durch Pulverpressen

Plastizitätskennwerte erreicht, die sich mit den in üblicher Weise geschmiedeten Stücken vergleichen lassen. Hinzu kommt, daß diese pulvergeschmiedeten Werkstücke eine größere Homogenität im Gefüge aufweisen. Das Grundprinzip des Verfahrens besteht darin, daß zunächst loses Pulver mit 42 bis 56 MPa Druck zu einem *Rohling* gepreßt wird, der dem Endprodukt in der Form schon sehr nahe kommt. Der „grüne" Rohling wird dann, je nach dem gewählten Verfahren und verwendeten Werkstoff, bei einer Temperatur von 760 bis 1 100 °C gesintert und anschließend in konventionellen Schmiedevorrichtungen heiß geschmiedet. Erfolgt dies aus der Sinterhitze ohne nochmalige Erwärmung, so spricht man vom *Sinterschmieden*. Spezielle, in der Regel auf Graphit basierende Schmiermittel sichern das gewünschte Fließen des Materials im Gesenk.

Strangpressen ermöglicht, aus Pulvern (z. B. Aluminiumpulver) strangförmige Halbzeuge unmittelbar herzustellen. Vorwiegend werden komplizierte Profile, einschließlich Rohre, gepreßt.

Sonderverfahren. Zu den Sonderverfahren mit zunehmender Bedeutung zählen das *Magnetimpulsverfahren*, die *Verdichtung mit Ultraschalleinwirkung*, die *Zentrifugalkraftverdichtung* in rotierenden Formen, die *elektrische Impulsver-*

dichtung (elektrodynamischer Impulsgeber) und die *Explosionsverdichtung*.

3.4.4. Sintern metallischer Pulver

Unter *Sintern* wird eine Wärmebehandlung eines geschütteten oder auch vorverdichteten Metallpulvers mit dem Ziel verstanden, einen festen Formkörper zu erzeugen. Hierbei wird Pulver unter Vermeidung von Schmelztemperaturen für die Hauptkomponenten zu einem kompakten Körper gesintert. Die Berührungsflächen der angelagerten oder zusammengepreßten Pulver sollen in stabile Verbindungen überführt und der Porenraum definiert eingestellt, z. B. bei Filtern, oder aber völlig bzw. weitestgehend beseitigt werden, z. B. bei dichten Bauteilen. In Abhängigkeit von der Temperatur kann man beim Sintern vereinfachend 3 Teilvorgänge beobachten. So werden Teilchenbindungen bei geringen Temperaturen durch *Adhäsionswirkung* bestimmt. Bei höheren Temperaturen verlaufen die Platzwechselvorgänge der Atome von einem zum anderen Pulverteilchen zunächst an der Oberfläche (*Oberflächendiffusion*), und schließlich wird der Gesamtvorgang bei steigender Temperatur dadurch bestimmt, daß auch die Atome aus dem Inneren des Kristalls am Diffusionsprozeß teilnehmen (*Gitter-* oder *Volumendiffusion*).

Weiterhin sind u. a. Rekristallisationsvorgänge, plastisches Fließen örtlicher Kristallbereiche und Stofftransportvorgänge über die Gasphase zur Deutung des Sintervorgangs heranzuziehen. Sintern die Pulver bei Temperaturen, bei denen der Schmelzpunkt einer Komponente überschritten ist, dann wird der Sinterprozeß beschleunigt. Zusätzlich tritt die geschmolzene Komponente durch Kapillarwirkung in die feinen Zwischenräume der festen Komponente und erhöht somit die Dichte. Sinterprozesse können zur Vermeidung unerwünschter Reaktionen bei höheren Temperaturen (z. B. Oxydation) sowohl im Vakuum als auch unter Schutzgas durchgeführt werden. Häufig wird reiner Wasserstoff (H_2) verwendet, insbesondere, wenn die Reduktion von Pulvern, die aus Oxiden gewonnen werden, erwünscht ist bzw. wenn Oxidhäute bei Metallpulvern, die eine hohe Affinität zum Sauerstoff haben, beseitigt werden sollen.

Anstelle des teuren, reinen Wasserstoffs wird in der Technik vorwiegend zerlegtes Ammoniak (NH_3) oder teilweise verbranntes Ammoniak verwendet. Die Verbrennung des Ammoniakwasserstoffs kann so weit geführt werden, daß der gesamte Wasserstoff in H_2O übergeführt wird und somit das Schutzgas aus dem verbleibenden Ammoniakstickstoff und dem aus der Verbrennungsluft stammenden Stickstoff besteht, was eine wesentliche Volumenzunahme zur Folge hat. Als Schutzgas kommen ferner Naturgas (Methan) sowie Leucht- oder Generatorgas in Betracht. Weiterhin werden, je nach teilweiser Verbrennung einzelner Gasbestandteile, Endo-, Exo- und Monogase als Schutzgase erzeugt.

Sintereinrichtungen. Für das diskontinuierliche Sintern werden z. B. *Kammer-* oder *Haubenöfen*, für das kontinuierliche Sintern z. B. *Hoch-* und *Mittelfrequenzanlagen*, *Durchlauföfen*, *Hubbalkenöfen* eingesetzt. Das *Indirektsintern* erfolgt in Sinteröfen mit *Heizwiderständen*,

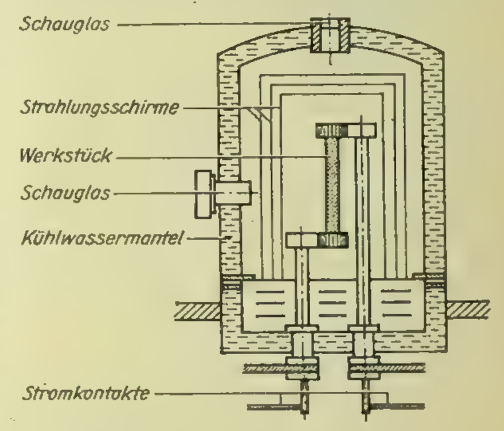


Abb. 3.4.4-1 Sinterglocke zur direkten Sinterung von hochschmelzenden Metallen und Legierungen

Strahlungsrohren u. a., während beim *Direktsintern* der Strom direkt durch das Sintergut fließt (Abb. 3.4.4-1). Hinzu kommen u. a. solche Sonderverfahren wie *Induktionssintern* und *Elektroimpulssintern*.

Nachbehandlung von Sinterwerkstoffen. *Kalibrieren.* Die gesinterten Teile müssen z. T. kalt nachgepreßt werden, wenn sehr hohe Maßgenauigkeit verlangt wird.

Tränken. Zur Erzielung spezieller Werkstoffeigenschaften, wie Verschleißfestigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Gleitfähigkeit, können die gesinterten porösen Bauteile mit anderen Metallen oder Öl getränkt (infiltriert) werden. Zur Erzeugung von Kontaktwerkstoffen wird z. B. ein Skelettkörper aus Wolfram mit Silber oder Kupfer getränkt. Dadurch wird eine Kombination von guter Verschleißfestigkeit und elektrischer Leitfähigkeit erzielt. Selbstschmierende Lagerschalen werden mit Öl getränkt. Oberflächenschutz zur Verringerung der Korrosion und zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit wird durch Lackieren, Galvanisieren, Brünieren, Inchromieren, Nitrieren u. a. Verfahren erreicht.

Wärmebehandlung. Zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit werden Sinterteile *aufgekohlt* und anschließend gehärtet.

3.4.5. Pulvermetallurgische Werkstoffe

Ob ein Werkstück oder Halbzeug pulvermetallurgisch oder durch herkömmliche Verfahren, wie Gießen oder spanlose bzw. spangebende Formgebung, hergestellt werden sollte, ist von der benötigten Stückzahl, der Stückmasse, der Kompliziertheit der Werkstückform, den geforderten Werkstoffeigenschaften und Bearbeitungswerkzeugkosten abhängig.
Der pulvermetallurgischen Fertigungsmethode ist immer dann der Vorzug zu geben, wenn
– die Herstellung von Werkstücken mit geforderten spezifischen Eigenschaften mit Hilfe der Schmelz- und Gießtechnik nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich ist (z. B. hochschmelzende Werkstoffe, Pseudolegierungen, Hartmetalle),
– eine Herstellung von Fertigteilen ohne Nacharbeit anstelle von bisher aus Halbzeugen spangebend erzeugten Werkstücken möglich wird,
– eine Herstellung von Fertigteilen mit besonderen physikalischen Eigenschaften und hoher Maßhaltigkeit erforderlich ist (z. B. Kontakt-, Magnetwerkstoffe),
– eine Herabsetzung der Herstellungskosten der Werkstücke oder Halbzeuge in Verbindung mit einem erhöhten Ausbringen, also eine höhere Stückzahl, und damit eine bessere Materialausnutzung erreicht werden kann.
Eine Einteilung der pulvermetallurgischen Werkstoffe kann nach dem stofflichen Aufbau und dem Einsatzgebiet erfolgen (Tab. 3.4.5-1). Sinterwerkstoffe überdecken (außer hochfesten und Sonderwerkstoffen) Festigkeitsbereiche bis ≈ 600 MPa. Eine weitere Steigerung der Festigkeit kann über eine Erhöhung der Dichte des Werkstoffs, eine geeignete Wahl der Legierungselemente und durch eine Vergütungsbehandlung erreicht werden. Entwicklungsschwerpunkte sind die weitere Verbesserung der Herstellungsverfahren sowie der Eigenschaften von Werkstücken und Halbzeugen. So wird der Weiterentwicklung der Stähle, wie z. B. der phosphorlegierten Sinterstähle, der Mangan- und chromlegierten Sinterstähle und der mit Nickel legierten lufthärtbaren Sinterstähle mit Festigkeiten > 600 N/mm^2, besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Auch korrosionsbeständige Sinterstähle mit Kupferzusätzen ($\sigma_B \approx 700$ N/mm^2) oder Stellit-Legierungen, Reibwerkstoffe, Hartmetalle, Verbundwerkstoffe u. a., sind bzw. werden entwickelt.

Tab. 3.4.5-1 *Ausgewählte pulvermetallurgische Erzeugnisse und ihre Einsatzgebiete*

Erzeugnis	Einsatzgebiet
Eisenpulver	Umhullungsmasse für Schweißelektroden, Zusatzstoff beim Brennschneiden
Aluminiumpulver	Farbpulver, Gasbeton, Schädlingsbekämpfung, Reduktionsmittel
Sintereisen, -stahl	Fertigteile, selbstschmierende Gleitlager, Weicheisenteile der Gleichstromtechnik, hochfeste Maschinenteile (Zahnräder, Pleuelstangen), korrosionsfeste Bauteile
Sinterwerkstoffe mit definierter Porigkeit auf Eisen-, Nickel- und Buntmetallbasis	Metallfilter, Flammensperren (in Chemieanlagen und Gasleitungen gegen Flammenrückschlag)
Sinteraluminium (Aluminium-Silizium-Legierung)	Leichtmetalle mit hoher Warmfestigkeit, Motoren- und Flugzeugbau
Magnetwerkstoffe auf Eisen-Nickel-Aluminium-Basis (weich- und hartmagnetisch, weich- und hartmagnetische Ferrite)	Meßgeräte, Kleindynamos, Kleinmotoren
Reibwerkstoffe (*Friktionswerkstoffe*) aus metallischen und nichtmetallischen Komponenten (SiO_2, Al_2O_3, SiC)	Bremsbeläge, Kupplungsbeläge
Gleitwerkstoffe (*Antifriktionswerkstoffe*) mit Graphitzusatz	Gleitlager, Führungen, Gleitsteine
Reinstwerkstoffe	physikalische Sonderwerkstoffe, Vakuumtechnik
Kontaktwerkstoffe (*Tränklegierungen*)	Kontakte in der Schwachstrom- und Starkstromtechnik, Schwitzkühllegierungen für Raketendüsen, Schwermetalle $\varrho > 16{,}5$ g/cm^3, Schwingmassen und Hammer in automatischen Uhren
hochschmelzende Werkstoffe (Wolfram, Molybdän, Tantal, Zirkonium, Hafnium)	Glühlampenwendel, Röhrenelektroden, Kontakte, Spinndüsen, Heizleiter
Hartmetalle (Karbide, Nitride, Boride, hochschmelzende Metalle in einem Bindemetall)	spanende Werkzeuge, hochbeanspruchte Teile in Umform- und Schnittwerkzeugen
Verbundwerkstoffe aus Karbiden, z. B. Molybdän-, Titan- und Wolframkarbid und Aluminium- und Chromoxiden	Schneidkeramik
Cermets (engl. aus „ceramic" und „metals" gebildet) aus Metall und Karbiden, Oxiden bzw. Boriden	Hochtemperaturwerkstoffe
Metallkohlen aus Kupfer-Zink oder Bleibronze mit 5 bis 80 Masse-% Graphit	Schleifkontakte

Beim Gießen wird das Metall im flüssigen Zustand in eine vorbereitete Form gefüllt, deren Gestalt es nach dem Erstarren beibehält. Man unterscheidet den *Block-* oder *Strangguß* (vgl. 3.2.2.), bei dem *Halbzeug* hergestellt wird, und den *Formguß*, der die fertige Werkstückform ergibt. Die Eigenschaften des fertigen Gußstücks werden durch die Zusammensetzung des flüssigen Metalls des Gießgutes und die Art und Ausbildung der Form beeinflußt. Das Zusammenwirken von Form und Gießgut bezeichnet man auch als *Gießprozeß*.

3.5.1. Gießgut

Als *Gießgut* kommen Stahl, Grau-, Temperguß, Schwer- und Leichtmetalle in Frage. Mengenmäßig hat am Gießgut der Grauguß den größten Anteil, gefolgt vom Stahl- und Temperguß. Der als Gießgut benötigte Stahl wird in *Blasstahlkonvertern*, *Elektrolichtbogen-* und *Induktionsöfen*, eventuell in *Siemens-Martin-Öfen*, erzeugt (vgl. 3.2.2.). Grau- und Temperguß werden überwiegend im *Kupolofen* (Abb. 3.5.1-1) erschmolzen. Dabei handelt es sich um einen zylindrischen Schachtofen, der mit feuerfestem Material ausgekleidet ist. Er wird intermittierend (periodisch) betrieben, d. h. an jedem Schmelztag neu angezündet. Der Einsatz (*Gattierung*) besteht aus Gießereiroheisen, Gußbruch, Stahlschrott, Ferrolegierungen, Kalkstein und Koks (≈ 8 bis 10 %). Der Kalk bildet mit der Koksasche und den während des Schmelzens oxydierten Legierungsbestandteilen die Kupolofenschlacke, die aus dem Schlackenabstich abläuft. Dem Ofen führt man während des Schmelzens meist vorgewärmten Wind zu, um durch Verbrennung des Kokses die erforderliche Arbeitstemperatur und Ofenatmosphäre zu erreichen. Das flüssige Gußeisen sammelt sich im unteren Teil des Ofens oder im Vorherd und wird von Zeit zu Zeit abgestochen. Der Durchsatz von Kupolöfen liegt je nach Größe zwischen 1 und 25 t Gußeisen/h.

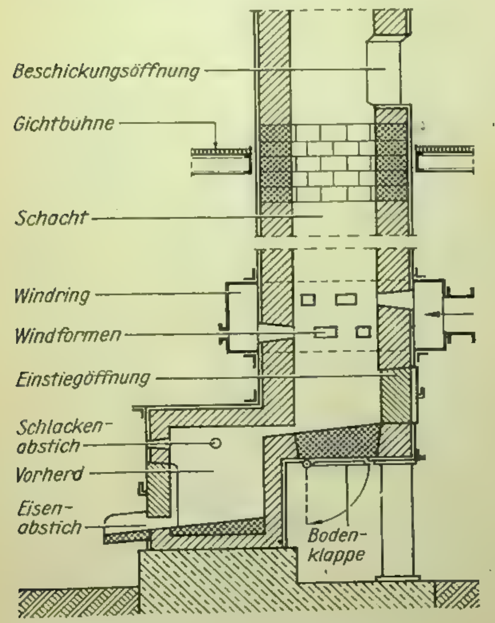


Abb. 3.5.1-1 *Kupolofen mit Vorherd*

Die Schwermetalle, wie Messing, Bronze, Zinn, Zink und Blei, sowie die Leichtmetalle Aluminium und die Magnesiumlegierungen werden meist in Induktionsöfen erschmolzen (vgl. 3.2.2.).

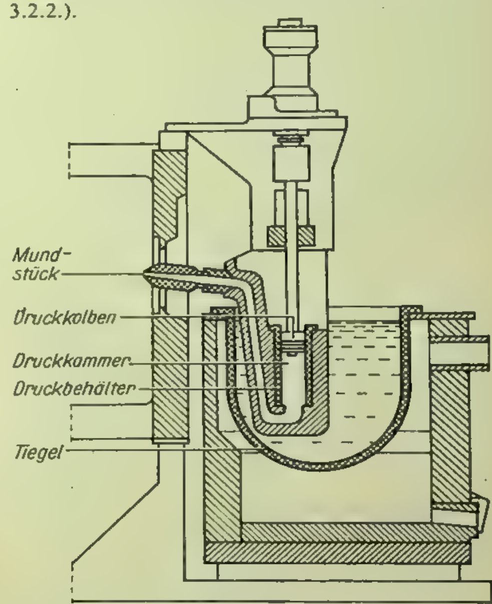


Abb. 3.5.2-1 *Warmkammer-Druckgußverfahren*

3.5.2. Formguß

Die Einteilung der Verfahren beruht darauf, ob das Gießgut durch die Wirkung der Schwerkraft, der Fliehkraft oder durch Druck in eine dem gewünschten Fertigerzeugnis entsprechende Form gefüllt wird.

Beim *Schwerkraftguß*, dem gebräuchlichsten Verfahren, fließt das Metall infolge seiner Schwerkraft von selbst in die Gießform. Man benutzt hierfür hauptsächlich *Einzelgießformen*, d. h. solche Formen, die jeweils nur einen Guß aushalten (*verlorene Form*). Sie werden aus entsprechenden Formstoffen (vgl. 3.5.3). hergestellt.

Beim *Druckguß* wird das Metall unter Druck in eine Dauerform aus Stahl mit hohem Druck eingepreßt. Hohlräume im Gußstück werden durch Stahlkerne gebildet. Nach der Art der Druckkammeranordnung werden das sog. *Warmkammerverfahren* (Abb. 3.5.2-1), bei dem sich die Druckkammer innerhalb des gießfertig gehaltenen Metalls befindet, und das *Kaltkammerverfahren* (Abb. 3.5.2-2), bei dem die Druckkammer außerhalb der Schmelze unmittelbar an der Druckgußform angebracht ist, unterschieden. Mit diesen Verfahren werden Gußstücke aus Zink-, Aluminium-, Magnesium- und Messinglegierungen hergestellt.

Schleuderguß. Das Gießgut wird in die horizontal gelagerten, um ihre Längsachse rotierenden *Dauerformen (Kokillen)* gegossen und durch die Fliehkraft an die Formwandungen geschleudert, an denen es erstarrt (Abb. 3.5.2-3). Schleudergußteile sind frei von Gasblasen und Lunkern und haben ein dichtes Gefüge. Das Verfahren eignet sich zur Serienfertigung rotationssymmetrischer Körper, wie Rohre, Büchsen und Ringe, vorwiegend aus Gußeisen, Stahl und Kupferlegierungen bis zu 1,5 t Masse.

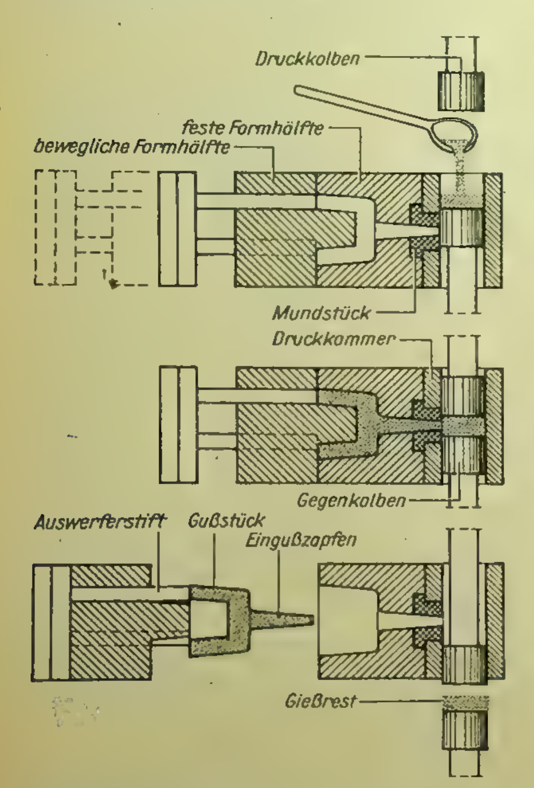


Abb. 3.5.2-2 Druckgußverfahren mit senkrechter Kaltkammer

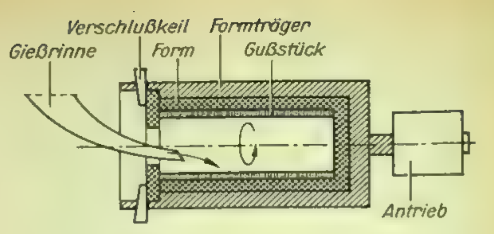


Abb. 3.5.2-3 Waagerecht-Schleuderguß

3.5.3. Formenherstellung

Bei der Gußstückfertigung stellt die Formenherstellung einen wichtigen Teilprozeß dar. Seine Hauptaufgabe ist die Bereitstellung eines den Konturen des Gußteils nachgebildeten Formhohlraums, in dem sich die Gußstückbildung vollzieht.

Gießformen sind entweder für den einmaligen Gebrauch (*Einzelgießformen* oder *verlorene Formen*) oder für eine unterschiedlich große Anzahl von Abgüssen (*Dauerformen*) vorgesehen.

Einzelgießformen. Hier wird zuvor ein Modell des gewünschten Gußstücks hergestellt, danach ein Formstoff darum verdichtet und das Modell anschließend entfernt. Sie sind hauptsächlich zum Vergießen von Stahl- und Gußeisen üblich, wofür man nur in Sonderfällen Dauerformen verwendet.

Modelle bilden den Hohlraum im Formstoff und müssen daher – unter Beachtung des Schwindmaßes – dem fertigen Gußstück entsprechen. Als Werkstoff dient vor allem Holz, das vom Modelltischler zum Modell geformt und verleimt wird, so daß es sich nicht verzieht. Modelle bestehen häufig aus mehreren Teilen, die mit Dübeln zusammengesteckt werden.

Holzmodelle werden verschiedenfarbig angestrichen, um ein Quellen durch Feuchtigkeitsaufnahme zu verhindern und um sie zu unterscheiden. Das ist wegen der unterschiedlichen Schwindungszugaben wichtig. Die *Modellfarben* sind: Blau für Stahl- und Temperguß, Rot für Gußeisen, Gelb für Schwermetall und Grün für Leichtmetallguß, Schwarz für Kernmarken und Gelbschraffur für Flächen mit *Bearbeitungszugabe*, die notwendig ist, wenn nach dem Gießen noch eine spanende Bearbeitung erfolgen muß.

Bei großen Produktionsstückzahlen oder hohen Genauigkeitsforderungen werden Modelle auch aus Leichtmetall, Grauguß oder Messing gefertigt.

Beim Maschinenformen werden oft Modellplatten mit aufgeschraubten Modellhälften eingesetzt und dadurch ein schnelleres Trennen von Modell und Form ermöglicht. Beim Erstarren und Abkühlen verringert das Metall sein Volumen, d. h., es schwindet. Daher müssen Modell

Tab. 3.5.3-1 *Schwindungszugaben*

Metall	Zugabe in %
Grauguß	1
Temperguß	0–2,5[1]
Stahlguß	2
Aluminium- und Magnesiumguß	1,25
Messing	1,5
Bronze, Rohguß	1,5
Zinn	0,5
Zink	1,5
Blei	1

[1] Das Schwinden ist abhängig vom Werkstoff, von der Schmelz-, Gieß- und Glühweise sowie von der Form des Gußstücks.

und Form um eine Schwindungszugabe größer sein als das Fertigteil (Tab. 3.5.3-1).

Kerne müssen an jenen Stellen der Form eingebaut werden, an denen im Gußstück Hohlräume vorgesehen sind. Die Kerne werden z. T. manuell in geteilten *Kernkästen* aus Kernformstoff gefertigt oder mit *Kernformmaschinen* hergestellt.

Mit *Kernblas-* und *Kernschießmaschinen* wird Formstoff (mit einem Binder vermischter Quarzsand) mit Preßluft in Kernkästen befördert. Beim *Blasen* durchwirbelt die Preßluft den Sand und drückt ihn dann in den Kernkasten, während beim *Schießen* die Preßluft schlagartig unter Expansion auf den Formstoff drückt und diesen in den Kernkasten schießt (Luftgewehrprinzip). Mit diesen Maschinen können Kerne mit komplizierter Form bis 100 kg Masse hergestellt werden.

In *Kernstopfmaschinen* wird die Kernmasse durch Kolbendruck oder mit einer Schnecke aus Düsen gepreßt, deren Austrittsöffnungen den Kernquerschnitten entsprechen. Die Trocknung der Kerne erfolgt in gasbeheizten Kammern oder in Elektrotrockenschränken.

Modernste Kernherstellungsverfahren arbeiten mit kunstharzhaltigen Sanden nach dem Hot-Box- und dem Cold-Box-Verfahren.

Beim *Hot-Box-Verfahren* werden nicht rieselfähige kunstharzhaltige Quarzsande in heiße Metallkernkästen eingebracht und bilden bei Berührung mit den beheizten Wänden rasch eine harte Randzone. Sie besitzen dann ausreichende Festigkeit, um aus der Form entnommen werden zu können, während die Härtung des Kerns im Inneren anschließend selbständig erfolgt. Es entstehen dabei äußerst stabile Kerne mit einer sauberen Oberfläche.

Cold-Box-Verfahren. Der kunstharzhaltige Quarzsand wird in kalte Kernkästen eingebracht und erhärtet in wenigen Sekunden unter dem Einfluß einer Luftbegasung. Die Kerne haben eine gute Festigkeit und Oberfläche und können sofort in die Form eingelegt werden.

Formstoffe zur Herstellung von Einzelgießformen und Kernen sind formbare, rieselfähige, pastöse oder flüssige Stoffe, die eine kantenscharfe, standfeste, feuerfeste sowie hinreichend gasdurchlässige Form ergeben müssen. Man verwendet *Formsande*, die meist aus Quarz und einem Bindemittel (10 bis 25 % Ton) bestehen. In der Natur vorkommende Formstoffe, die Ton als Bindemittel enthalten, heißen *Natursande*. Formsande, denen ein Bindemittel zugemischt wird, meist Quarz mit Bentonit als Binder, heißen *synthetische Formsande*. Gebrauchte Formsande werden vor der erneuten Benutzung aufbereitet, d. h. mit ≈ 20 bis 50 % Neusand vermengt. Man unterscheidet weiter *plastische Formsande*, die angefeuchtet und beim Formen verdichtet werden müssen, und *nichtverdichtbare Sandmischungen*, wie Zementsand (tonfreier Quarzsand mit 8 bis 10 % Zement als Binder und 4 bis 5 % Wasser), oder *kunstharzgebundene Sande* (vgl. Formmaskenverfahren). Für die Herstellung von schweren Stahlgußstücken wird wegen der höheren Gießtemperaturen als Formstoffgrundmasse Schamotte (30 bis 40 % Al_2O_3; 45 bis 65 % SiO_2) verwendet, der ≈ 10 % Ton sowie Wasser zur Formherstellung zugesetzt werden.

Wasserglas-CO_2-Verfahren. Tonfreier Quarzsand wird mit 5 % Natronwasserglas und einem lockernden Zusatz vermengt. Die Mischung muß innerhalb von 6 h zu Formen oder Kernen verarbeitet werden. Nach dem Einformen wird CO_2 über die Form oder den Kern geblasen und der Sand dadurch in 30 bis 60 s erhärtet. Da kein Trocknen und Brennen erfolgt und somit eine gute Maß- und Formbeständigkeit vorhanden ist, eignet sich dieses Verfahren besonders zur Kernherstellung.

Herd- oder Grubenguß. Einfache, flache Gußteile geringer Dicke werden in einer flachen Mulde (*Herd-* oder *Gießbett*) des Gießereibodens eingeformt. Da die Form meistens oben offen bleibt, kann man durch das Abdecken mit einem Kasten noch eine saubere Oberfläche erzielen (*gedeckter Herdguß*). Der Formstoff muß hierbei jedoch sorgfältig verdichtet und die Form gegen ein seitliches Ausweichen beim Gießen durch Absteifungen gesichert werden.

Kastenformen. Zur Herstellung von Einzelgießformen wird Formstoff in rahmenartige, oben und unten offene Formkästen eingestampft. Diese bestehen aus Grau-, Stahlguß oder profiliertem Stahlblech. Die Gasdurchlässigkeit der Form wird durch Einstechen feiner Kanäle (*Luftstechen*) erhöht. Die Standfestigkeit großer Formen wird durch Sandhaken und Kerneisen verbessert und die Kerne durch *Kernstützen* in ihrer Lage festgelegt. Letztere müssen mit dem Gießwerkstoff verschweißen, dürfen jedoch nicht zu früh abschmelzen. Formsande mit geringen Tongehalten müssen den zur Formfähigkeit zugesetzten Wasseranteil behalten, da sie sonst zerbröckeln würden. Man bezeichnet solche

Formen als *Naßgießformen*. Formstoffe mit höheren Tongehalten werden getrocknet (*Trokkengießform*) und vor allem für Gußstücke größerer Wanddicke verwendet.

Handformen. Eine Modellhälfte wird auf das *Aufstampfbrett* gelegt und der *Unterkasten* aufgesetzt, in dem der Formsand festgestampft wird. Nach dem Wenden des Unterkastens wird der *Oberkasten* aufgelegt und der Vorgang wiederholt sich mit der anderen Hälfte des Modells, wobei gleichzeitig Einguß- und Steigermodell mit dem Formsand eingebracht werden. Nach dem Stampfen werden der Oberkasten abgehoben, die Modellhälfte entfernt, die notwendige Anzahl Kerne eingebaut und die Kästen wieder aufeinandergesetzt (Abb. 3.5.3-2). Für den Zufluß des Metalls werden ein *Eingußtümpel* ausgeschnitten und die *Gießform* angeschnitten, d. h., es werden Quer- und Zulaufkanäle angebracht. Für die austretende Luft werden Steiger, d. h. nach oben führende Öffnungen, angelegt, die sich gegen Gießende mit Metall füllen.

Nach dem Handformverfahren lassen sich Gußstücke bis ≈ 400 t Masse herstellen. Die Arbeitsweise ist im Hinblick auf die Gußstückart und

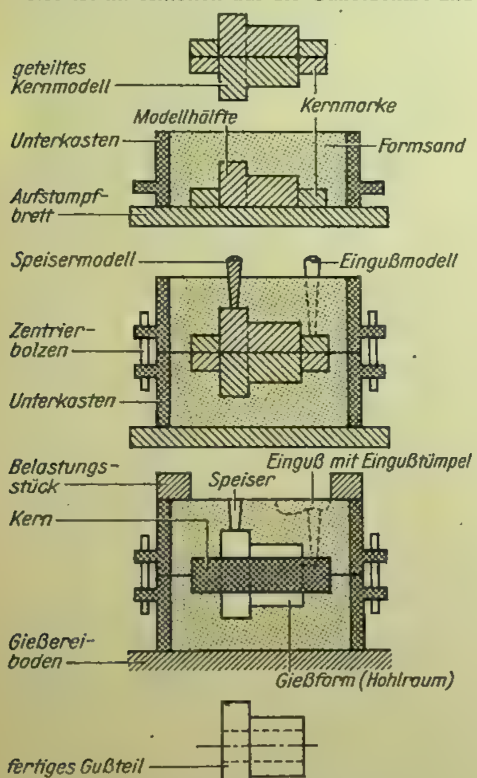


Abb. 3.5.3-2 *Einformen eines geteilten Kernmodells in Formkästen (Kastenformen)*

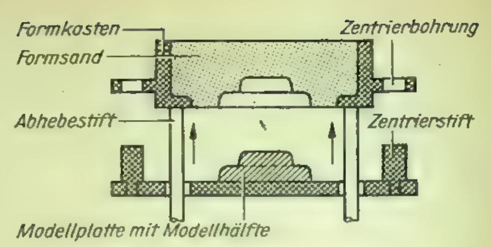


Abb. 3.5.3-3 *Stiftabhebeformmaschine*

-größe sehr vielseitig und besonders für kleinste Stückzahlen geeignet.

Maschinenformen. Mit diesem Verfahren wird eine höhere Produktivität und bessere Gleichmäßigkeit der Formen gegenüber der Handformerei erreicht. Die Maschinenformerei wird für die Herstellung großer Stückzahlen von Teilen mit wenigen Gramm bis zu mehreren Tonnen Masse eingesetzt. Formmaschinen arbeiten paarweise an einer Kastenform, d. h. eine füllt den Ober-, die andere den Unterkasten.

Moderne Gießereien arbeiten mit *Formautomaten*, die zu *Formfließlinien* zusammengekoppelt sind und aus *Formstation*, *Gießstation*, *Abkühlstrecke* und *Ausleerstation* bestehen. Sie haben ein großes Leistungsvermögen, sind aber nur für ein enges Sortiment vorgesehen.

Nach der Art der Herausnahme des Modells aus der Form unterscheidet man verschiedene Formmaschinenarten.

Abhebeformmaschinen. Der Formkasten wird vom Modell abgehoben (Abb. 3.5.3-3). Beim *Absenkverfahren* wird das Modell abgesenkt und der Kasten bleibt fixiert. Beide Prinzipien werden bei niedrigen und unkomplizierten Modellen eingesetzt.

Bei *Durchzugformmaschinen* wird das Modell nach Fertigung der Form durch eine Durchzugplatte, in der die Umrißform des Modells ausgespart ist, nach unten entfernt (Abb. 3.5.3-4) und anschließend der Formkasten abgehoben.

In *Wendeplattenformmaschinen* sind Modellplatte und Formkasten um eine horizontale Achse drehbar. Während des Einformens liegt der Kasten auf der Modellplatte. Anschließend werden beide gewendet und entweder der Kasten abgesenkt oder die Platte nach oben abgezogen.

Nach dem Verdichtungsprinzip des Formstoffs unterscheidet man mehrere Formmaschinenarten.

In *Rüttelformmaschinen* wird die Modellplatte mit Kasten in kurzen Abständen bis zu 60mal um 30 bis 100 mm gehoben und dann auf eine harte Unterlage fallengelassen. *Preßformmaschinen* verdichten den Formstoff, indem der mit Formstoff gefüllte Formkasten gegen einen Preßkopf gedrückt wird. Je nach Preßdruck unterscheidet man zwischen Niederdruck- (0,5 bis 0,7 MPa) und Hochdruckpreßformmaschinen (0,7 bis 2,5 MPa).

In *Schleuderformmaschinen (Slinger)* wird der Formsand mit einem Bandförderer auf ein schnell rotierendes Schaufelrad transportiert, von dem es in die Form geschleudert wird (Abb. 3.5.3-5). Formmaschinen werden meist pneumatisch (mit Druckluft von 5 bis $7 \cdot 10^5$ Pa), sonst hydraulisch, mechanisch oder elektrisch angetrieben.
In der Formherstellung sind eine Reihe von Sonderverfahren entwickelt worden.
Beim *Vollformgießverfahren* werden Modelle aus Kunstschaumstoff herausgeschnitten, nach den bisher beschriebenen Formverfahren eingeformt, wobei das Modell in der Form verbleibt und durch die Hitze des Metalls vergast bzw. verbrannt wird.
Das *Wachsausschmelzverfahren* verwendet Modelle aus Wachs oder Kunstharz, die mehrmals mit zwischengeschalteter Trocknung in eine Aufschlämmung von Formstoff (feiner Quarzsand oder -mehl mit Äthylsilikat) getaucht werden, bis eine ≈ 1 cm dicke Schicht entstanden ist. Durch anschließendes Glühen des Körpers schmilzt der Modellwerkstoff und tropft heraus. Die entstandene Form wird dann in Sand eingebettet und ist besonders für Präzisionsguß geeignet.
Beim *Maskenformverfahren (Croning-Verfahren)* wird der Formstoff, der aus einem Gemisch von Sand und Kunstharz besteht, auf die Modellplatte aufgebracht. Die auf 330 bis 370°C erwärmte Modellplatte führt zur Härtung des im Formstoff enthaltenen Kunstharzes, so daß nach einigen Minuten eine selbsttragende, stabile Maskenform entsteht. Der überschüssige Formstoff wird von der Maske abgekippt und wieder verwendet. Die fertige Maskenform besteht aus

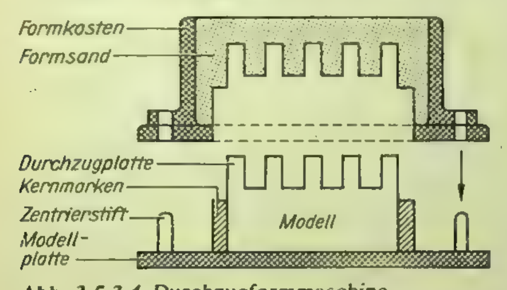


Abb. 3.5.3-4 *Durchzugformmaschine*

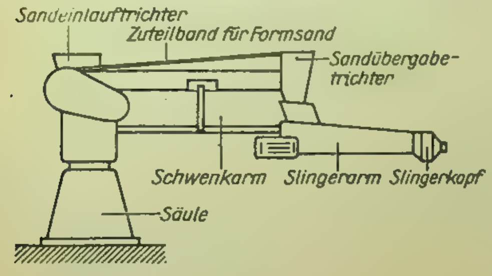


Abb. 3.5.3-5 *Stationäre Slingeranlage*

2 Hälften, die zusammengeklebt oder verklammert werden und in die dann das Metall eingegossen werden kann. Jede Maske ist nur einmal verwendbar.
Gießvorgang. Die Metallschmelze fließt infolge der Schwerkraft aus der Gießpfanne in den *Einguß* der Form. Je nach Gießgutmenge wird entweder aus der tragbaren *Handpfanne*, aus der von 2 Personen bewegten *Scherpfanne*, aus einer schienenfahrbaren *Trommelpfanne* oder am Kran hängenden *Kranpfanne* durch Kippen der Pfanne das Gießgut in die Form entleert. Eine Ausnahme bildet die für Stahlguß verwendete *Stopfenpfanne*, bei der der Abfluß des Stahls durch ein Loch im Boden der Pfanne erfolgt, das mit einem Stopfen verschlossen wird.
Gußputzen. Nach dem Erstarren des Gießgutes wird die Einzelgießform zerstört (*Ausleeren*), Einguß und Speiser werden abgetrennt und das Gußstück geputzt. Bei großen Gußstücken wird mittels Druckluftmeißels, Handschleifmaschine, Abgrat- oder Sägemaschine oder autogen durch Brennputzen (vgl. 8.3.1.), bei kleinen Gußstükken durch Strahlen (mit Sand, Stahlkies o. a.) von Hand oder in Strahlputzmaschinen, anhaftendes Formmaterial entfernt. Beim *Naßputzen* werden die Gußstücke mit Hilfe von Druckwasser (5 bis 15 MPa) geputzt und die Kerne herausgespült.
Dauerformwerkstoffe. Dauergießformen bestehen meist aus Gußeisen, unlegiertem bzw. legiertem Stahl oder auch Graphit. Sie werden als *Kokillen* bezeichnet und speziell zum Vergießen von Aluminium-, Magnesium-, Kupfer-, Zink-, Blei-, Zinnlegierungen sowie von Stahl und Gußeisen verwendet. Die Kokillen ermöglichen einige tausend bis max. 10^5 Abgüsse. Beim Vergießen von Gußeisen und Stahl verschleißen sie aber wegen deren höherem Schmelzpunkt schneller, und die Anzahl der Abgüsse liegt bei max. 100. Kokillen ermöglichen sehr maßgenaue Abgüsse, sind aber wegen der hohen Herstellungskosten erst bei $> 10^3$ Abgüssen wirtschaftlich.
Für den Messing- und Bronzeguß können auch Formen aus Siliziumkarbid mit Wasserglas als Bindemittel eingesetzt werden, die bis 10^3 Abgüsse erlauben.

3.6. Halbzeugherstellung durch Umformung

3.6.1. Grundlagen

Unter der Halbzeugfertigung durch Umformung versteht man metallurgische Fertigungsverfahren, in denen Erzeugnisse durch bildsame Änderung der Form eines festen Körpers aus metal-

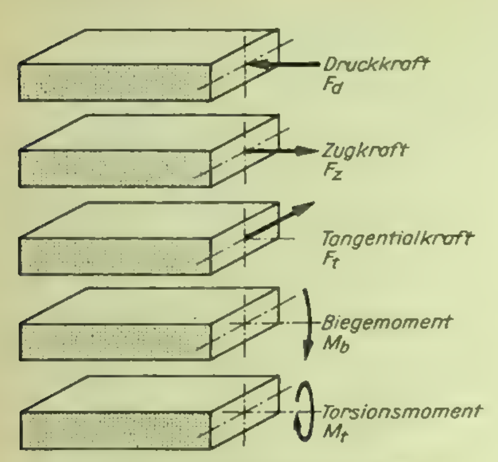


Abb. 3.6.1-1 Darstellung der Belastungsmöglichkeiten bei der Umformung

lischen Werkstoffen produziert werden, wobei sowohl die Masse als auch der Werkstoffzusammenhalt erhalten bleiben. Die Erzeugnisse dienen als Ausgangsmaterial für andere Fertigungsverfahren (vgl. 8.).

Ein Umformvorgang ist stets an die Wirkung äußerer Kräfte bzw. Momente gebunden. Am Beispiel des prismatischen Stabs sind in Abb. 3.6.1-1 5 Möglichkeiten für den Angriff von Kräften bzw. Momenten dargestellt. Diese Beanspruchungsarten bilden die Grundlage für die *Gliederung der Umformverfahren* (vgl. 8.2.2. bis 8.2.5.).

Wird ein metallischer Körper durch eine Kraft bzw. Spannung beansprucht, so erfährt dieser zunächst eine *elastische Formänderung*. Beim Entlasten verschwindet die elastische Formänderung. Wird dieser Körper über eine bestimmte Spannung hinaus beansprucht, so erfolgt nach der elastischen eine *plastische* oder *bleibende Formänderung*. Diese Spannung, die

Tab. 3.6.1-2 *Rekristallisations- und Warmumformtemperatur verschiedener Metalle in °C*

Metall	Temperatur der Rekristallisationsglühung	Warmumformtemperatur
Kupfer	520...730	850... 950
Messing	500...700	700... 900
Aluminium	370...400	450... 500
Duraluminium	270...350	400... 450
Zink		160... 180
Zinn	50...100	150... 170
Blei		50...4 150
Nickel	780...850	1 100...1 200
weicher Stahl (0,1 % C)	600...700	850...1 200

zur Einleitung und Aufrechterhaltung der plastischen Formänderung bei einachsiger Beanspruchung benötigt wird, wird als *Umformfestigkeit* bezeichnet. Sie ist eine Werkstoffkenngröße und von Umformtemperatur, -geschwindigkeit und Formänderung abhängig.

Mit zunehmender Formänderung ist eine höhere Spannung aufzubringen, da der Widerstand des Werkstoffs gegen die Abgleitung erhöht wird. Diese Festigkeitssteigerung – die *Verfestigung* – kann durch eine Wärmebehandlung, die Rekristallisationsglühung, rückgängig gemacht werden. Erfolgt die Umformung bereits bei einer Temperatur, die höher als die Rekristallisationstemperatur des betreffenden Werkstoffs liegt (Tab. 3.6.1-2), so spricht man von einer *Warmumformung*, im anderen Falle von *Kaltumformung*.

Bei allen technischen Umformverfahren ist eine höhere Spannung als die Umformfestigkeit zur plastischen Umformung aufzubringen, da Reibungsverluste und Verluste durch innere Werkstoffverschiebungen eintreten. Die tatsächlich aufzubringende Spannung kann um das 1,3- bis 20fache höher sein als die theoretisch erforderliche.

Das Umformen setzt beim Werkstoff ein *Umformvermögen* voraus, d. h. die Fähigkeit, seine Gestalt unter dem Einfluß äußerer Kräfte bzw. Spannungen bleibend oder plastisch und in einem genügend großen Maße zu verändern, ohne daß der Zusammenhalt des Werkstoffs verlorengeht. Grundlage einer jeden Umformung eines kristallinen metallischen Werkstoffs ist, daß die einzelnen Kristallite durch die Wirkung der Spannungen längs bestimmter Gitterebenen, den Gleitebenen, die vom Kristallsystem abhängig sind, Schiebungen erleiden können, ohne daß der metallische Zusammenhalt zerstört wird. Das Umformvermögen eines Werkstoffs ist vom Gefügezustand, Spannungszustand bei der Umformung sowie der Umformtemperatur und -geschwindigkeit abhängig. Unter der Einwirkung von Druckspannungen ist das Umformvermögen eines Werkstoffs um ein Mehrfaches höher als unter Zugspannungen.

3.6.2. Walzen

Walzen dient hauptsächlich zur Herstellung von Halbzeug, d. h. von Flacherzeugnissen (Bleche und Bänder), Profilen, Stabstahl, Draht und Rohren. Es ist ein Umformverfahren mit direkter Druckwirkung. Der Walzvorgang kann als ein ununterbrochenes Druckumformen zwischen balligen, sich drehenden Preßflächen aufgefaßt werden. Prinzipiell kann man zwischen Längs- und Querwalzen unterscheiden. Beim *Längswalzen*, dem am häufigsten anzutreffenden Verfahren, bewegt sich das Walzgut zwischen 2 sich in entgegengesetzter Richtung drehenden Walzen mit zueinander parallelen Achsen, wobei eine

Höhenabnahme bzw. Flächenverringerung und damit eine Streckung in Längsrichtung erfolgt (Abb. 3.6.2-1). Die maximal möglichen Reibungskräfte begrenzen das Greifen bzw. Durchziehen des Walzguts im Walzspalt. Je nach Walzverfahren, Temperatur und Umformvermögen ist die mögliche Höhen- bzw. Querschnittsabnahme in einem *Stich*, dem Durchgang durch die Walzen, verschieden; in jedem Falle sind stets mehrere Stiche für das Erreichen des Endquerschnitts erforderlich.

Je nachdem, ob Flacherzeugnisse oder Profile zu walzen sind, wird zwischen dem Walzen auf der Flachbahn und in Kalibern unterschieden (Abb. 3.6.2-2). Das Längswalzen wurde wegen seiner Einfachheit und technischen Vorteile bereits sehr frühzeitig zur Bearbeitung von Metallen eingesetzt.

Von den *Querwalzverfahren* besitzt das *Schrägwalzen* bei der Halbzeugfertigung eine große Bedeutung für die Herstellung warmgewalzter Hohlkörper, wie Luppen oder Rohre (Tafel 15). Es beruht darauf, daß ein Rundknüppel schraubenförmig durch 2 konische, in einem bestimmten Winkel zueinander stehende Walzen bewegt wird (Abb. 3.6.2-3).

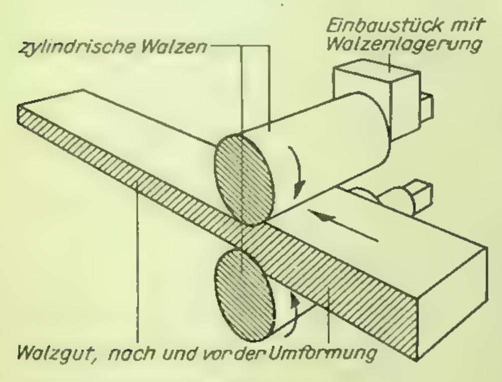


Abb. 3.6.2-1 *Flachwalzen*

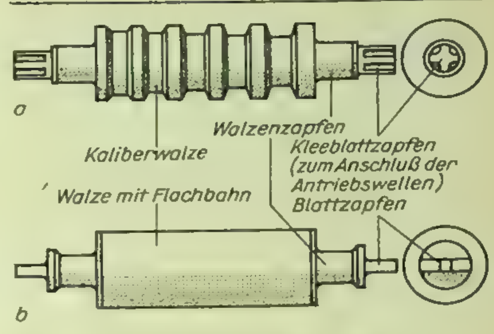


Abb. 3.6.2-2 *a Kaliber-, b Flachwalze*

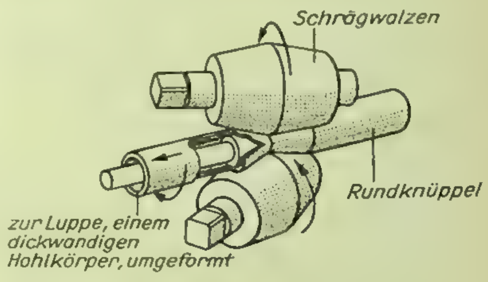


Abb. 3.6.2-3 *Querwalzen (Schrägwalzen von Luppen)*

Walzgerüste bestehen aus 2 Ständern und den darin gelagerten, rotierenden Walzen aus Stahlguß, Stahl oder Hartstoffen (Tafel 14, 15). Die Walzen (*5*) werden über Kuppelspindeln (*4*), das

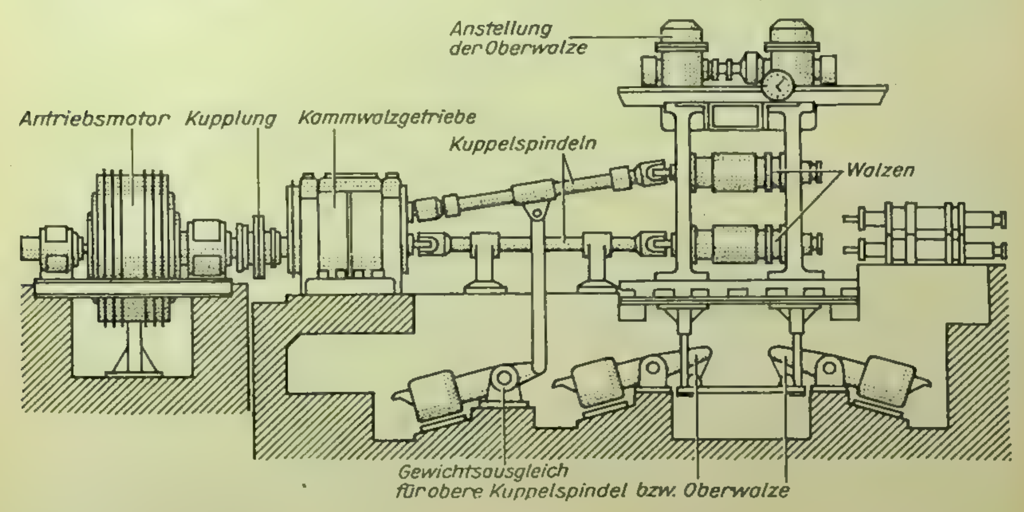


Abb. 3.6.2-4 *Blockwalzwerk*

Kammwalzgetriebe (*3*) und in den meisten Fällen noch ein Untersetzungsgetriebe von einem Elektromotor (*1*) angetrieben (Abb. 3.6.2-4). Die Höhe des Walzspalts kann bei kleinen Anstellwegen von Hand eingestellt werden, erfolgt aber heute in nahezu allen Fällen hydraulisch oder durch Elektromotor. Zur Erleichterung des Anstellvorgangs kann die anzustellende Walze mit einem Masseausgleich (*6*) versehen werden. Je nach der Anzahl der in einem Gerüst übereinander angeordneten Walzen werden Duo-, Trio-, Quarto- und Mehrrollengerüste unterschieden (Abb. 3.6.2-5).

Duogerüste werden eingesetzt in:
– Umkehrstraßen für schweres Walzgut, wie Blöcke, Brammen, Träger, Schienen und Grobblech,
– Hochleistungs- und kontinuierlichen Straßen für Halbzeug, Formstahl, Stabstahl, Draht usw.,
– Feinblechstraßen zum Walzen in Einzeltafeln mit nicht angetriebener Oberwalze,
– Kaltwalzgerüsten für Bleche und Bänder.
Triogerüste mit festgelagerter Mittelwalze werden eingesetzt in:
– sog. offenen Straßen für Träger, Schienen, Knüppel, Formstahl u. a. Profile,
– offenen Stabstahl- und Drahtstraßen geringerer Leistung usw.
Quartogerüste werden eingesetzt:
– als Umkehrgerüst und in Umkehrstraßen,

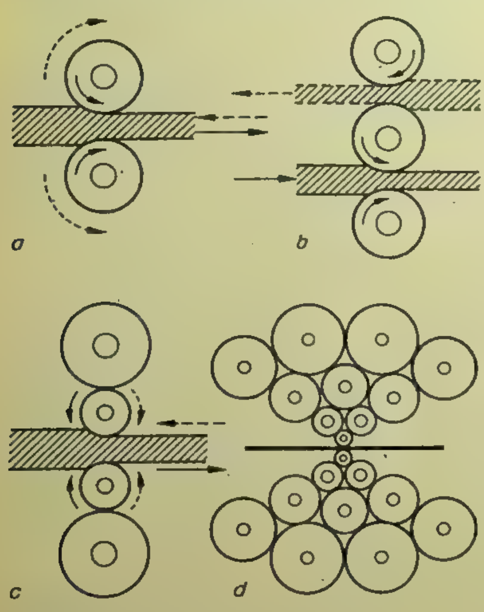


Abb. 3.6.2-5 *a Duogerüst, b Triogerüst, c Quartogerüst, d 20-Rollengerüst*

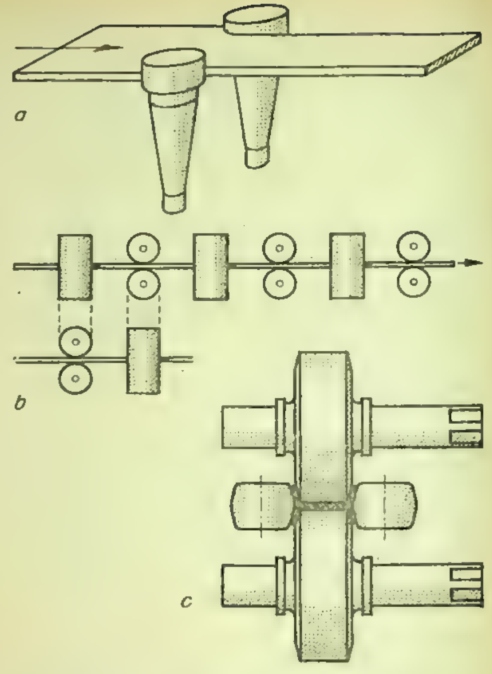


Abb. 3.6.2-6 *a Vertikalgerüst zum kontinuierlichen Warmwalzen von Grobblech und Bändern zur Bearbeitung der Seitenflächen des Walzgutes und b zum kontinuierlichen drallfreien Walzen von kleinem und mittlerem Stabstahl und Profilen, c Universalwalzwerk für Breitflanschträger von 300 bis 1 200 mm Höhe*

– in kontinuierlichen Straßen mit unveränderlicher Drehrichtung,
– zum Warm- und Kaltwalzen von Blechen, Schmal-, Mittel- und Breitband sowie Folien.

Insbesondere beim Walzen von Flacherzeugnissen ist man bestrebt, mit einem kleinen Durchmesser zu arbeiten, um die Walzkräfte zu senken und die bessere Streckwirkung dünnerer Walzen auszunutzen. Die dünne *Arbeitswalze* stützt sich gegen eine oder mehrere *Stützwalzen* ab. Die Walzen können im Gerüst waagerecht oder senkrecht (Abb. 3.6.2-6) angeordnet werden.
Bei *Umkehr-* oder *Reversiergerüsten* wird nach jedem Stich die Drehrichtung gewechselt. Dadurch werden Transportwege gespart. Mehrere Walzgerüste bilden mit den zugehörigen Transporteinrichtungen, wie dem *Rollgang* mit zylindrischen Rollen für den Längstransport und konischen Rollen für den Längs- und Quertransport, *Wipptischen* für den Vertikaltransport, *Verschiebeeinrichtungen* für den Quertransport, eine *Walzstraße*. Man unterscheidet nach dem von der Walzgutdicke abhängigen Walzendurchmesser — außer dem nur aus einem Gerüst

bestehenden Blockwalzwerk – *Grob-*, *Mittel-* und *Feinstraßen* bzw. nach dem Erzeugnis *Knüppel-*, *Profil-*, *Stabstahl-*, *Draht-*, *Warm-* bzw. *Kaltband-* und *Rohrstraßen*.

Am Ende des Auslaufrollgangs aller Walzstraßen befindet sich eine Säge oder Schere, auf denen das Walzgut in Gebrauchslängen unterteilt wird. Eine Neuentwicklung stellen die sog. *Walzblöcke* dar, die zum Warmwalzen von Stabstahl und Draht dienen. Diese für sehr hohe Walzgeschwindigkeiten von ≈ 50 m/s ausgelegten Walzwerke leiten eine neue Etappe im Walzwerkbau ein. Walzblöcke sind Fertigstraßen, die aus 8 bis 13 Gerüsten bestehen. Diese sind in einem Block auf engstem Raum mit einem gemeinsamen Antriebssystem zusammengefaßt. Die Maschinenteile und sonstigen Elemente sind weitgehend austauschbar. Die Walzgerüste sind meist gegen die Waagerechte um 45° und um 90° gegeneinander versetzt. Die Walze hat die Form einer runden Scheibe von 150 bis 220 mm Durchmesser und einer Dicke von ≈ 80 mm.

Walzen auf der Flachbahn. Von den Längswalzverfahren besitzt das *Warm-* und *Kaltwalzen auf der Flachbahn* von der Produktionsmenge her die größte Bedeutung. Brammen, Platinen, Grobbleche, Feinbleche, warm- und kaltgewalzte Bänder und Flachstahl aus Stahl und NE-Metallen werden auf der Flachbahn gewalzt. Annähernd 50 % der Walzstahlproduktion werden zu Blechen und Bändern verarbeitet, deren Anteil wegen der wachsenden Bedeutung des Schiffs-, Fahrzeug- und Behälterbaus sowie der Großrohrproduktion weiter ansteigt.

Moderne Grobblech-Quartowalzwerke ermöglichen die Walzung von über 4 500 mm breiten Grobblechen aus Brammen von 140 bis 180 t bei Antriebsleistungen von 26 000 kW.

Vollkontinuierliche Warmbreitbandstraßen für Bandbreiten von 2 200 mm walzen mit maximalen Endwalzgeschwindigkeiten von 22 bis 24 m/s. Die größten Bundmassen liegen bei 40 bis 45 t und die spezifischen Bundmassen bei 25 bis 28 kg/mm. Die Warmbandenddicken schwanken in einem weiten Bereich von 1,1 bis 16 mm und erfordern flexible Kühlstrecken und Haspelanlagen.

Der Arbeitsablauf auf einer vollkontinuierlichen Warmbreitbandstraße ist auf Abb. 3.6.2-7 dargestellt.

Die auf einem Blockbrammengerüst gewalzten Vorbrammen von 125 bis 200 mm Dicke werden zur Erwärmung auf Walztemperatur in den 5-Zonen-Stoßofen eingesetzt. Nach der Entnahme aus dem Ofen erfolgt auf dem Vertikalstauchgerüst das Walzen einer bestimmten Breite. Der Duozunderbrecher hat die Aufgabe, durch eine Höhenabnahme von ≈ 15 % den Zunder (Eisenoxide) zu lockern, der anschließend mit Dampf oder Druckwasser abgeblasen wird. In der viergerüstigen Quartovorstraße, wo jedes Gerüst mit Horizontal- und Vertikalwalzen ausgerüstet ist, erfolgt das Abwalzen der Bramme auf eine Dicke von ≈ 20 mm. Auf der Schere wird der Bandanfang abgeschnitten („geschopft") und das Band nach Durchlauf durch den Zunderbrecher in einer siebengerüstigen Quartofertigstaffel auf die Enddicke von ≈ 1,5 bis 2,0 mm ausgewalzt. Auf dem Auslaufrollgang kühlt das Band ab und wird von den Haspeln zu einem Bund aufgewickelt.

Zum Walzen von Aluminiumwarmband wurden in den letzten Jahren ebenfalls mehrgerüstige Warmbandwalzwerke hoher Leistung und auch *Bandgießwalzanlagen* in Betrieb genommen. Bei letzteren ist der Walzspalt gleichzeitig Kristallisator für das erstarrende Band, so daß nur relativ niedrige Walzkräfte zum Walzen des meist 6 bis 8 mm dicken und 1 400 bis 1 600 mm breiten Warmbands notwendig sind.

Beim *Kaltwalzen* findet eine Werkstoffverfestigung statt. Das Kaltwalzen von Blechen und Bändern aus Eisen- und NE-Metallen auf speziellen Kaltwalzwerken hat vor allem folgende Ziele, von denen je nach dem Verwendungszweck und Werkstoff bestimmte dominieren und andere zurücktreten:

– Erzielung dünnerer Abmessungen der warmgewalzten Bleche und Bänder,
– Herstellung einer blanken Oberfläche mit geringer Rauhtiefe,

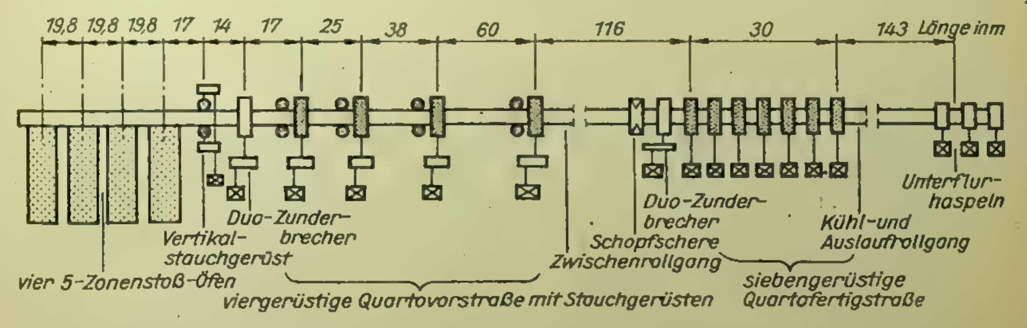


Abb. 3.6.2-7 Vollkontinuierliche Warmbreitbandstraße für Bandbreiten bis zu 2 030 mm bei einer Endwalzgeschwindigkeit von 15 m/s

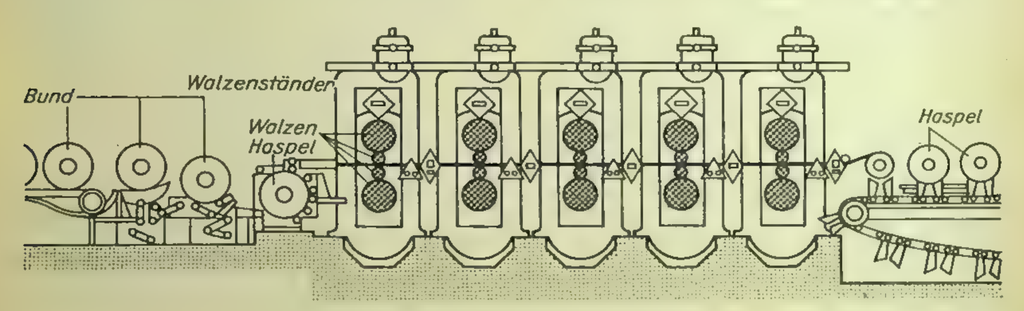
– Erreichung enger Dickentoleranzen und guter Ebenheit über Breite und Länge,
– verbesserte mechanische Eigenschaften durch eine gezielte Kaltverfestigung.

Für die Lösung der genannten Aufgaben sind eine Reihe von Arbeitsverfahren, wie das Beizen, Kontrollieren, gegebenenfalls Wärmebehandeln der Warmbänder bzw. Bleche vor dem Kaltwalzen, das Wärmebehandeln (vorzugsweise durch rekristallisierendes Glühen) nach dem Kaltwalzen, das Dressieren bzw. Kaltnachwalzen und Schneiden der kaltgewalzten Erzeugnisse, erforderlich. Für eine Reihe von Anwendungsgebieten schließt sich bei Stahlbändern eine Oberflächenveredlung durch Verzinken, Verchromen, Vernickeln, Aluminieren, Verzinnen oder Plastbeschichten an. Bei Aluminiumbändern können die Oberflächen u. a. durch anodische Oxydation, bei Kupferbändern durch Lackieren behandelt werden.

In zunehmendem Maße werden kaltgewalzte Bleche aus Stahl und NE-Metallen wegen der höheren Arbeitsproduktivität und besseren Qualität der kontinuierlichen Bandwalzprozesse über die Warm- und Kaltbandstufe hergestellt, so daß keine Feinblechwalzwerke mehr gebaut werden. *Schmalbänder* sind durch das *Längsspalten* von Breitbändern billiger herzustellen als aus schmalem Warmband, so daß für Stahl, Aluminium, Aluminiumlegierungen, Kupfer, Kupferlegierungen sowie Titan und Titanlegierungen der Entwicklungstrend zur Herstellung von Warm- und Kaltbändern bis zu einer Breite von 2200 mm und darüber erkennbar ist. Demgegenüber gibt es *Spezialwalzwerke*, auf denen Spezialbänder, z. B. für Uhrenfedern, von wenigen Millimeter Breite gewalzt werden. Für das Kaltwalzen kommen Einzelgerüste, wie Duo-, Quarto- und Mehrrollengerüste, insbesondere 20-Rollen-Gerüste, sowie mehrgerüstige Tandemwalzwerke zum Einsatz. *Duogerüste* werden meist für das Walzen von Aluminiumfolien von 8 bis 40 μm Dicke, für Stahlbänder bis 400 mm Breite und als Nachwalzgerüste auch für Breitband verwendet.

Quartoeinweggerüste mit Zug- und Bremshaspeln werden für das Walzen von NE-Metallen, insbesondere von Aluminiumbändern, bevorzugt.

Für das Stahlband- und Kupferbandwalzen kleinerer Mengen (bei Stahl < 25000 t/Monat) sowie bei wechselnden Sortimenten werden bevorzugt *Quartoumkehrgerüste* mit 2 gleichgroßen Haspeln eingesetzt. Hier bleiben die Bandenden nach Ablauf des Bands in den Haspeln, und die Walzrichtung wird gewechselt. Kaltbänder aus höherfesten NE-Metallen, wie Titanlegierun-



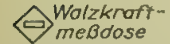


Abb. 3.6.2-8 *Fünfgerüstige Kaltbandtandemstraße*

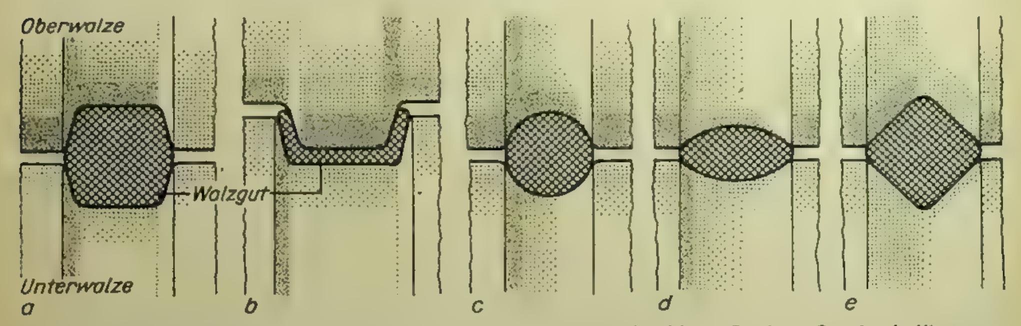


Abb. 3.6.2-9 *Kaliberformen: a Kasten-, b Formstahl-, c Rundstahl-, d Oval-, e Quadratkaliber*

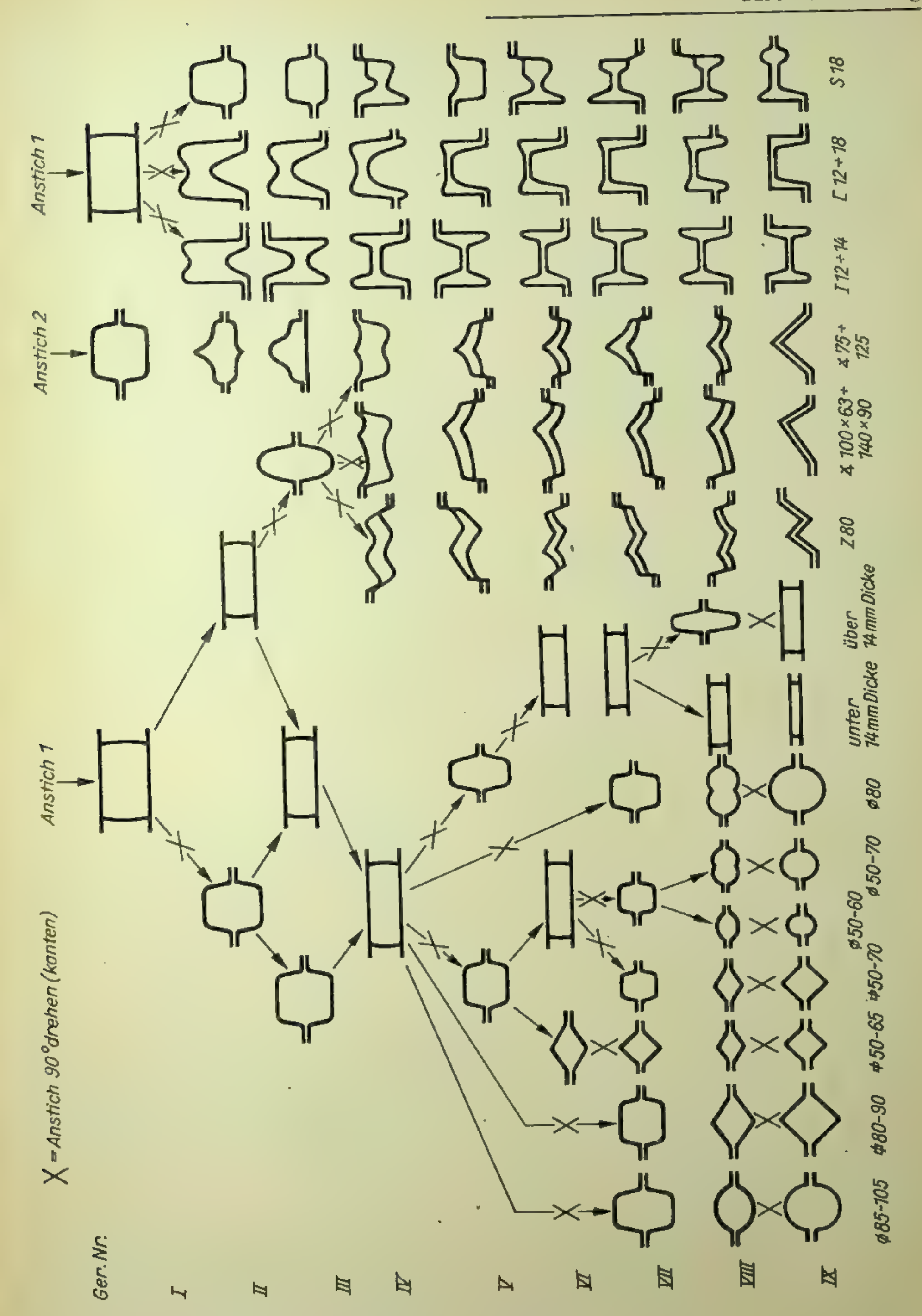


Abb. 3.6.2-10 *Kalibrierung und Walzplan einer Mittelstraße für Profile*

gen, sowie Edelstähle walzt man zweckmäßigerweise auf Mehrrollen-, vorzugsweise auf *20-Rollen-Gerüsten*, da durch die kleinen Arbeitswalzen eine höhere Abnahme erzielt werden kann. Während beim Kaltwalzen von rostbeständigem Band auf Duo- und Quartogerüsten Stichabnahmen von 3 bis 4 bzw. 6 bis 8% erzielt werden, liegen diese mit 15 bis 18% bei 20-Rollen-Gerüsten wesentlich höher.

Kontinuierliche Kaltbandstraßen, sog. *Tandemwalzwerke* (Abb. 3.6.2-8), werden für das Walzen von breiteren Stahlbändern meist in vier- bis sechsgerüstiger, bei Aluminiumbändern in zwei- bis dreigerüstiger Ausführung eingesetzt.

Für solche Straßen sind große Losgrößen und Jahresmengen ≧ 250000 t erforderlich. Für große Mengen von Edelstahlbändern, insbesondere aus rost- und säurebeständigen Stählen, kann eine Tandemstraße auch aus 3 20-Rollen-Gerüsten mit vor- und nachgeschalteten Duogerüsten aufgebaut sein.

Warmwalzen in Kalibern. Durch das Walzen in Kalibern werden Halbzeug, Stabstahl, Draht und Profile hergestellt. In die Walzen konzentrisch eingedrehte Rillen (Abb. 3.2.6-9) unterschiedlichster Form, die sog. *Kaliber*, ermöglichen das Walzen der verschiedensten geometrischen Formen, wie z. B. Rund-, Vierkant-, Sechskant-, Achtkant-, Halbrundformen, oder Profile, wie Winkel, Schienen, Träger-, U-, I-, Z-Profile usw. Die Aufeinanderfolge von formähnlichen Kalibern wird als *Kaliberreihe* bezeichnet.

Man unterscheidet nach der Walzfolge Vorbereitungs-, Schlicht- und Fertigkaliber, deren Form und Querschnittgröße so abgestimmt sein sollen, daß mit einem Minimum an Stichen, geringem Kraft- und Arbeitsbedarf sowie Walzenverschleiß eine hohe Formgenauigkeit bei schonender Umformung des Werkstoffs erzielt wird.

Als Vormaterial dienen in Kokillen gegossene Blöcke quadratischen Querschnitts und Massen von ≈ 2,5 bis 10 t, die in Tief- bzw. Stoßöfen auf Walztemperatur erwärmt werden. Auf der Blockstraße werden die Blöcke auf einen rechteckigen Querschnitt vorgewalzt. Diese bzw. Stranggußknüppel als Vormaterial werden auf Grobstraßen zu schweren Profilen oder zu Halbzeug, das das Vormaterial für Mittel- und Feinstraßen darstellt, umgeformt. Den technologischen Fluß vom gegossenen Block bis zum fertigen Walzerzeugnis vermittelt Tafel 86.

Vierkantiges Halbzeug von 70 bis 200 mm wird am günstigsten in Kastenkalibern auf Blockwalzwerken und in Quadrat-Rauten-Kaliberreihen auf Halbzeugkontistraßen sowie auf Grobwalzwerken mit 2 bis 3 Gerüsten in offener Anordnung und Walzendurchmessern von ≈ 700 bis 950 mm gewalzt. Auf Grobwalzwerken erfolgt auch die Walzung großer Rundabmessungen von 80 bis 300 mm Durchmesser.

Mittlerer Stabstahl als Rund-, Vierkant-, Sechskant-, Achtkant- und Flachstahl im Abmessungsbereich von 35 bis 80 mm wird auf Mittelstahlwalzwerken in offener, halbkontinuierlicher oder kontinuierlicher Bauart gewalzt (Abb. 3.6.2-10).

Die Walzung von feinem Stabstahl (< 35 mm) und Draht mit 5 bis 13 mm Durchmesser in den gleichen Formen, jedoch vorwiegend als Rund-, Vierkant- bzw. Flachprofil, erfolgt entweder auf offenen oder halbkontinuierlichen Feineisen- oder Drahtwalzwerken bzw. auf kombinierten Formeisen- und Drahtwalzwerken ebenfalls in offener, halbkontinuierlicher oder kontinuierlicher Gerüstanordnung.

In letzter Zeit werden zunehmend kontinuierliche Feineisen- oder Drahtwalzwerke als Einzweck-Hochleistungsanlagen mit Jahresleistungen von 0,6 bis 1,0 Mio t bei eingeengtem Sortiment gebaut. Der breite Abmessungsbereich der Profile führt dazu, daß ihre Walzung auf sehr unterschiedlichen Anlagen erfolgen muß.

Das Walzen der größten Profilabmessungen einschließlich der Schienen erfolgt auf schweren Profilwalzwerken mit Zwei- bzw. Dreiwalzenanordnung und Walzendurchmessern von 780 bis 950 mm. Auch diese Walzstraßen besitzen, insbesondere für das Walzen von Parallel- und Breitflanschträgern, Universalgerüste mit Horizontalwalzen von 1000 bis 1450 mm Durchmesser und Vertikalwalzen von 650 bis 1000 mm Durchmesser.

3.6.3. Rohrherstellung

Warmwalzen von Rohren. Bei der Herstellung warmgewalzter, nahtloser Stahlrohre durch das *Quer-* bzw. *Schrägwalzen* kann aus einem Rundknüppel von ≈ 80 bis 120 mm Durchmesser nur eine mehr oder weniger dickwandige *Rohrluppe* hergestellt werden, aus der dann in weiteren Warmwalzstufen das warmfertige Rohr entsteht. Für große Rohre bis 650 mm Durchmesser kommen vorgelochte größere Blöcke und *Hohlstrangguß* zum Einsatz.

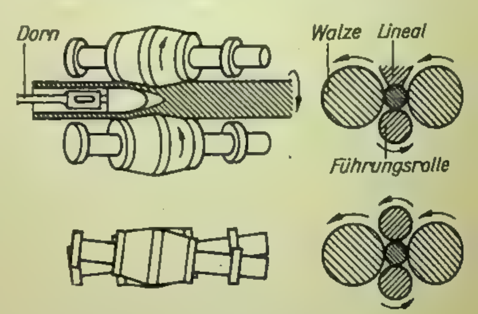


Abb. 3.6.3-1 Schrägwalzverfahren nach Mannesmann

Das Walzgut wird beim Schrägwalzen nicht geradlinig, sondern in Form einer Schraubenlinie umlaufend durch den Walzspalt geführt. Dieser wird durch 2 zueinander unter einem bestimmten Winkel gelagerte doppelkegelförmige Walzen, den Dorn und Führungsrollen bzw. Lineale gebildet. Die Walzen haben gleiche Drehrichtung, wodurch das Walzgut in Rotation versetzt wird, während die Vorwärtsbewegung durch die Schrägstellung der Walzen von 3 bis 12° bewirkt wird (Abb. 3.6.3-1).
Jedes Stoffteilchen an der Oberfläche wird bei jeder Umdrehung zweimal zwischen den Arbeitsflächen der Walzen gestaucht. Da dort Druckspannungen herrschen, bedingt das vorhandene Kräftegleichgewicht, daß im Kern Zugspannungen wirken. Durch das Umlaufen des Blocks ist der Kern der einzige Teil, der ständig hohen Zugspannungen unterworfen ist, während der Mantel nur in den Teilen beansprucht wird, die unter den Arbeitsflächen der Walzen durchlaufen. Die Folge ist eine Zermürbung des Kerns. Sie beginnt mit der Bildung feiner Risse, die allmählich zu groben Werkstofftrennungen und schließlich zur *Lochbildung* führen. Durch den *Dorn* wird der Lochbildungsprozeß unterstützt, außerdem glättet er die entstehende Luppeninnenwand. Abb. 3.6.3-2 veranschaulicht die verschiedenen Stadien der Lochbildung über die Länge des Walzspalts.
Technisch wird der Schrägwalzprozeß durch unterschiedliche Verfahren, die auf dem gleichen Grundprinzip beruhen, realisiert, z. B. *Mannesmann-* (Tafel 15) und *Stiefelverfahren*, *Kegel-* und *Scheibenlochapparat* nach *Stiefel*, *Assel-* und *Diescherwalzwerk*, *Elongatorverfahren*.
Zur Herstellung des dünnwandigen Fertigrohrs werden die Luppen in 2 Stichen auf einem automatischen Stopfenwalzwerk, einem Duowalzgerüst, zum Rohr gewalzt, und zwar über einen Stopfen, der auf eine Walzstange gesteckt ist. Außen- und Innenwand werden anschließend auf einem Glättwalzwerk geglättet. Zur Herstellung

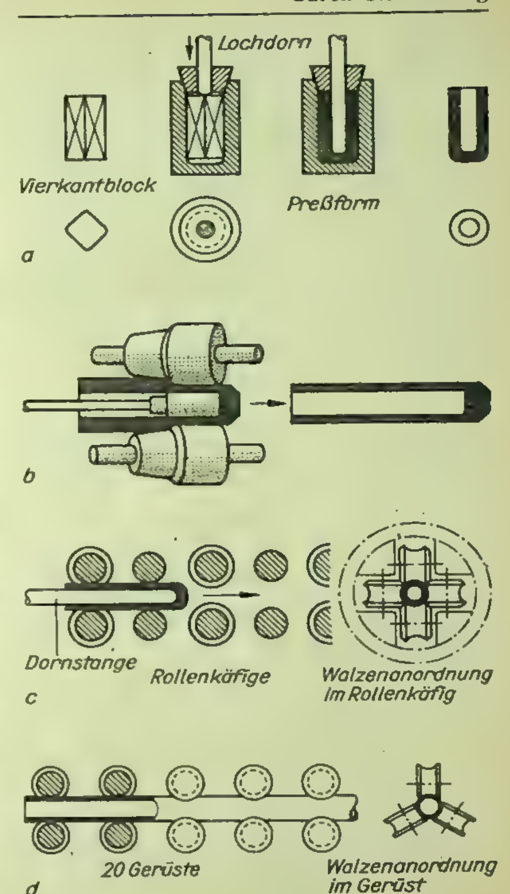


Abb. 3.6.3-3 *Stoßbankverfahren zur Herstellung nahtloser Rohre*

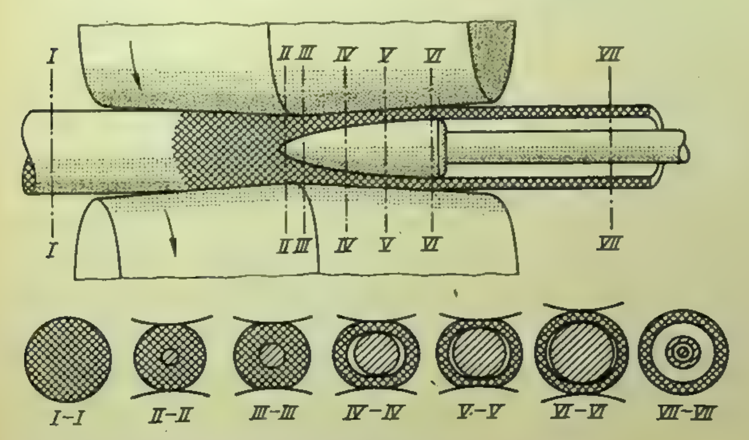


Abb. 3.6.3-2 *Lochbildung im Schrägwalzwerk*

dünner Rohre wird die Luppe zunächst auf einem *Streckwalzwerk*, dem *Elongator*, gestreckt und durchläuft dann, auf eine runde Dornstange gesteckt, ein kontinuierliches Walzwerk aus mehreren um 90° versetzten Walzenpaaren, deren Kaliber von Gerüst zu Gerüst enger werden.

Auf diesem kontinuierlichen Walzwerk kann je nach Konstruktion als *Reduzierwalzwerk* nur der Außendurchmesser bei gleichbleibender Wanddicke verringert („*reduziert*") werden und als *Streckreduzierwalzwerk* eine Verringerung des Außendurchmessers und der Wanddicke erfolgen. Im Schrägwalzprozeß wird der Werkstoff einer sehr hohen Beanspruchung unterworfen, so daß aufgrund des Formänderungsvermögens nicht alle Werkstoffe schrägwalzbar sind. Im sog. *Stoßbankverfahren* zur Herstellung nahtloser Rohre ist die Werkstoffbeanspruchung geringer. Bei diesem Verfahren wird ein Vierkantblock in einer hydraulischen Presse gelocht. Der entstehende dickwandige Hohlkörper mit Boden wird auf einem Schulterstreckwalzwerk gestreckt, anschließend auf eine Dornstange gesteckt und diese durch eine Anzahl Kaliberwalzen mit sich vom Anfang zum Ende der *Stoßbank* verkleinerndem Kaliber gestoßen. Dabei erfolgt eine Verringerung des Außendurchmessers und der Wanddicke. Der Innendurchmesser des Rohrs entspricht dem der Dornstange. Dem Lösen des Rohrs von der Dornstange schließt sich die weitere Umformung in einem Streckreduzierwalzwerk (Abb. 3.6.3-3) an.

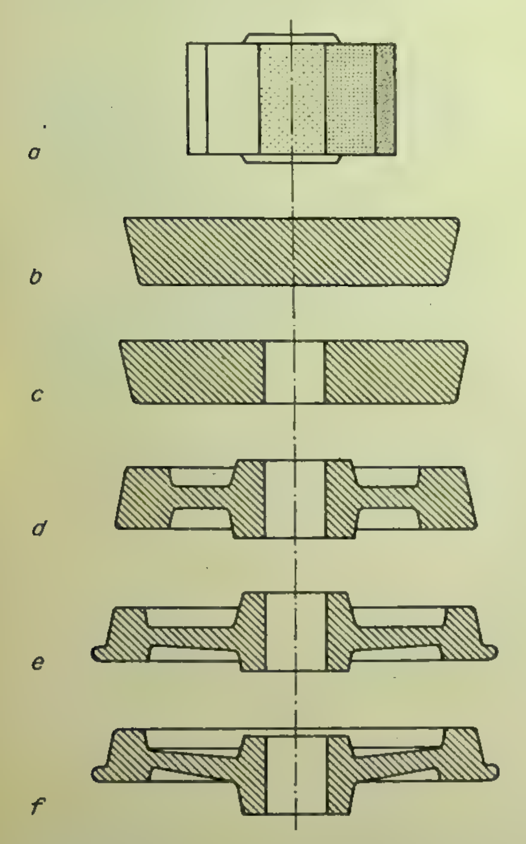


*Abb. 3.6.4-1 Herstellungsgang einer Radscheibe: **a** Einsatzblock, **b** Einsatzblock gestaucht und **c** gestaucht und gelocht, **d** gepreßte Vorform der Radscheibe, **e** gewalzte und **f** fertige gekümpelte Radscheibe*

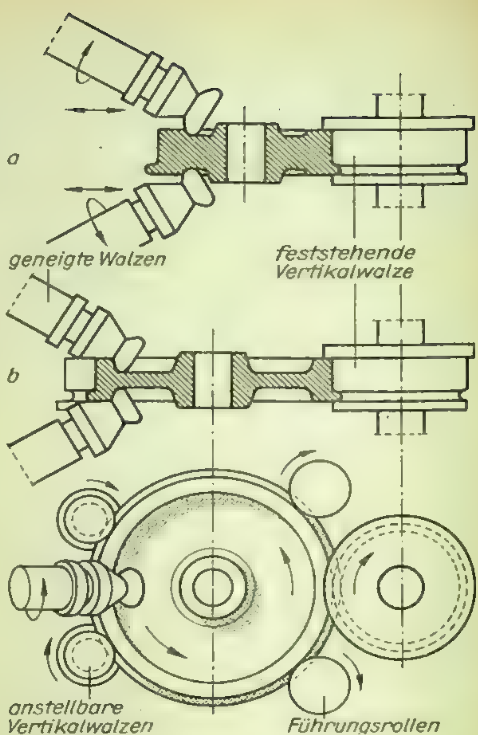


*Abb. 3.6.4-2 Radscheibenwalzwerk: **a** Beginn und **b** Ende des Walzens*

Kaltwalzen von Rohren. Durch *Kaltpilgern* werden Rohre oder Rohrluppen, insbesondere aus Wälzlagerstahl, rost- und säurebeständigen Stählen und NE-Metallen, kalt umgeformt. Dabei werden kleine Wanddicken und Durchmesser, die durch das Warmwalzen nicht erreichbar sind, enge Toleranzen und hohe Oberflächengüte angestrebt. Das Kaltpilgern beruht auf dem schrittweisen Auswalzen einer Ausgangsluppe bzw. eines Ausgangsrohrs in einem Duowalzwerk nach dem Prinzip des Längswalzens, wobei die Querschnittsabnahme je nach Werkstoff in einem Durchgang zwischen 30 und 85% liegen kann.

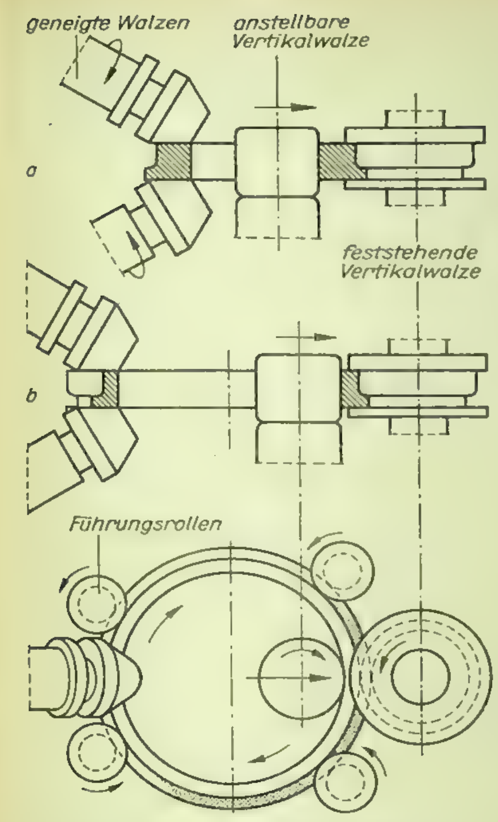


Abb. 3.6.4-3 Ringwalzwerk: a Anfangs-, b Endstellung beim Walzen einer Bandage

3.6.4. Walzen von Radscheiben, Ringen und Bandagen

Als Vormaterial zur Herstellung von Radscheiben, Ringen und Bandagen dienen gegossene oder gewalzte bzw. geschmiedete kleine Stahlblöcke mit rundem oder vier- bis achteckigem Querschnitt. Diese werden nach der Anwärmung auf Umformtemperatur auf einer Presse gestaucht und gelocht. Auf einer weiteren Presse erfolgt eine *Vorprofilierung* der Radscheibe, dem sich der Walzprozeß anschließt. Zur Verbesserung der Federungs- und Laufeigenschaften des Rades wird dieses „*gekümpelt*", d. h. die Nabe durchgebogen (Abb. 3.6.4-1a/f). Das Walzgerüst für Radscheiben (Abb. 3.6.4-2) hat 3 vertikale Walzen, von denen eine (*1*) feststehend und 2 (2,3) anstellbar sind. Die anstellbaren Walzen dienen der Bearbeitung der Lauffläche des Rades bzw. des Sitzes der auswechselbaren Bandage. Die geneigt angeordneten Walzen *4* und *5* walzen den Steg des Rades aus. Dabei vermindert sich seine Dicke und der Durchmesser vergrößert sich. Die Walzen *6* und *7* sind Führungsrollen. Angetrieben werden die Walzen *1*, *4* und *5*.

Ein Ringwalzwerk oder Bandagenwalzwerk (Abb. 3.6.4-3) hat 2 vertikale Walzen (*1*, *2*), 2 geneigte Walzen (*3*, *4*) sowie 4 Führungsrollen. Der gelochte Block wird zwischen der feststehenden Walze *1* und der anstellbaren Walze *2* zu einem Ring des gewünschten Innen- und Außendurchmessers ausgewalzt. Seine Form entspricht der Kalibrierung der Walzen. Die Breite des Rings bzw. der Bandage, z. B. ein Laufring für Eisenbahnräder, wird durch die Walzen *3* und *4* festgelegt. Nach der Umformung werden die gewalzten Erzeugnisse einer Wärmebehandlung unterzogen.

3.6.5. •Strangpressen

Strangpressen ist ein Umformverfahren für metallische Werkstoffe, bei dem der in einem geschlossenen Blockaufnehmer (*Rezipient*) befindliche Werkstoff unter Einwirkung der Preßkraft durch eine kalibrierte Öffnung, die Matrize, gepreßt wird. Die Preßkraft kann mechanisch oder hydraulisch aufgebracht werden. Strangpressen ist vorwiegend ein Warmumformverfahren. Strangpreßähnliche Kaltumformverfahren, wie *Fließpressen*, vgl. 8.2.2.

Da auf den Werkstoff im Rezipienten allseitig hohe Druckspannungen einwirken, können durch *Strangpressen* Werkstoffe oder Werkstoffzustände umgeformt werden, die nur ein relativ geringes Umformvermögen besitzen.

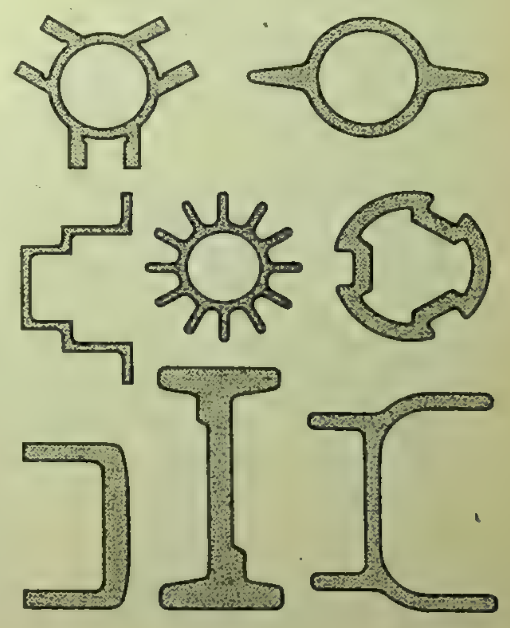


Abb. 3.6.5-1 Strangpreßprofile aus Stahl

Bekanntlich läßt sich ein Werkstoff unter Druckspannung besser umformen als mit Umformverfahren, bei denen eine oder mehrere Zugspannungskomponenten wirken. Die Formänderung beim Strangpressen kann daher sehr hoch sein ($\varepsilon_{max} \approx 99\,\%$). Die äußere Form des gepreßten Strangs entspricht der Matrizenöffnung (Abb. 3.6.5-1). Hohlprofile lassen sich mit einem Dorn pressen, wobei dessen Profil den Innenquerschnitt des gepreßten Hohlstrangs bestimmt.

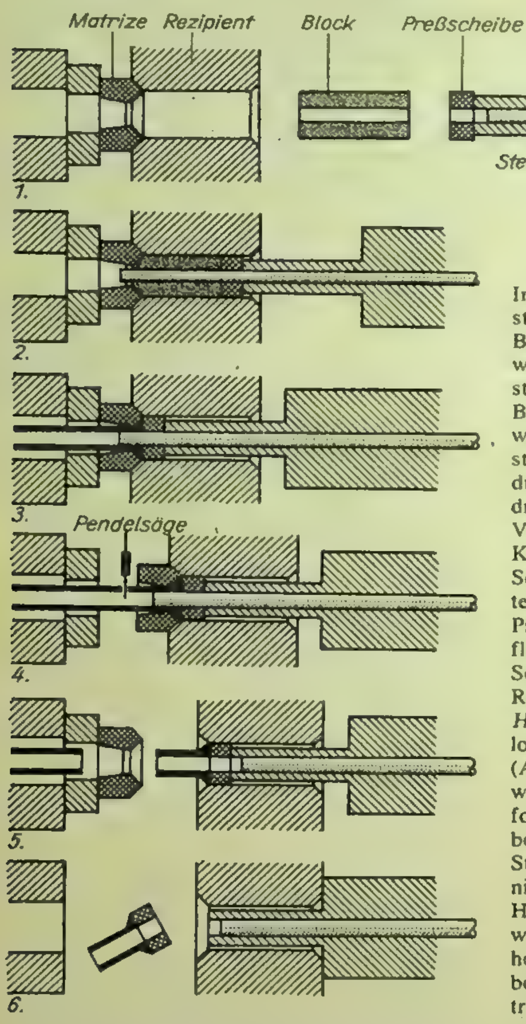


Abb. 3.6.5-2 Arbeitsgänge beim Strangpressen eines Rohrs

Beim *direkten Strangpressen* entspricht die Bewegungsrichtung des Preßstrangs der des Preßstempels.

Beim *indirekten Strangpressen* ist die Bewegungsrichtung des Preßstrangs der des Preßstempels entgegengesetzt. Der Preßstrang wird durch eine Bohrung im Preßstempel ausgedrückt.

Verschiedene NE-Metalle, wie Kupfer und Kupferlegierungen, werden teilweise „mit Schale" gepreßt. Durch einen Durchmesserunterschied zwischen Rezipient, angestauchtem Preßblock und -stempel bleibt die mit Oberflächenfehlern, Oxydationsprodukten und Schmiermittel behaftete Preßblockoberfläche als Resthülle zurück.

Hohlprofile können mit ungelochtem oder gelochtem Preßblock gepreßt werden (Abb. 3.6.5-2). Ersteren kann man einsetzen, wenn der Werkstoff bei den betreffenden Umformbedingungen eine geringe Umformfestigkeit besitzt. Ungelochte Blöcke werden auch beim Strangpressen von Stahlrohren auf mechanischen Pressen bzw. beim Strangpressen von Hohlprofilen aus NE-Metallen mittels Brückenwerkzeug verwendet. Bei Werkstoffen, die eine hohe Umformfestigkeit besitzen und bei denen beim Strangpressen Schmierungsprobleme auftreten, müssen die Preßblöcke vor dem Strangpressen gelocht werden, was auf einer besonderen Lochpresse oder durch Ausbohren erfolgt.

4. Chemietechnik

Die chemische Industrie nimmt in der Wirtschaft entwickelter Industriestaaten einen bedeutenden Platz ein. Das ist einmal durch den Umfang der chemischen Industrie selbst und zum anderen durch die hohen Zuwachsraten der industriellen Warenproduktion bedingt. Von besonderer Bedeutung innerhalb der Chemietechnik sind z. B. die Erdöl- und Erdgasverarbeitung, die Chemiefaser- und Plastherstellung, die Produktion von Düngemitteln sowie die Erzeugung von anorganischen Ausgangsstoffen, wie Schwefelsäure, Ammoniak, Kalziumkarbid, Soda, u. a. für die chemische Verfahrenstechnik.

Die industrielle chemische Großproduktion gründet sich auf Versuche im Laboratoriumsmaßstab, aus denen die notwendigen Parameter für die technische Realisierung zunächst in einer *Pilotanlage* gewonnen werden. Die damit erzielten Erkenntnisse werden sorgfältig ausgewertet und bilden die Grundlage für die Überleitung eines Verfahrens in die Produktion.

Das deutliche Ansteigen der Rohstoffpreise in den letzten Jahren stimuliert verstärkt die Entwicklung von Verfahren, bei denen ein hoher Ausnutzungsgrad der eingesetzten Ausgangsstoffe, z. B. durch Rückgewinnung von Lösungsmitteln aus Abgasen u. a. Abfallprodukten und Weiterverarbeitung der Abfallprodukte für andere Zwecke, erreicht wird. Gleichzeitig damit kann die Belastung der Umwelt durch die Industrie verringert werden.

In den chemisch-technologischen Prozessen treten immer wiederkehrende *physikalische Grundoperationen* und chemische Reaktionstypen auf (*unit operations*). Dazu gehören das *Zerkleinern* (Brechen, Mahlen, vgl. 1.6.1.), Versprühen und Reinigen. *Versprühen* wird zur Oberflächenvergrößerung von Flüssigkeiten eingesetzt, wobei sich – wie auch beim *Rieseln* über Füllkörper – eine feine Verteilung von Flüssigkeitströpfchen ergibt. Dieses Prinzip wird in Wasch- und Absorptionstürmen sowie Destillations- und Rektifikationskolonnen angewendet. Weiterhin zählen zu den physikalischen Grundoperationen Trennverfahren, wie *Klassieren* (vgl. 1.6.1.), *Filtrieren* (vgl. 1.6.3.) und *Zentrifugieren* (vgl. 1.6.3.). Durch *Destillieren* werden flüssige Stoffgemische getrennt. Durch Erhitzen wird die niedriger siedende Komponente verdampft und anschließend separat wieder kondensiert. Gemische aus mehreren flüssigen Komponenten werden *fraktioniert*, d. h. das Gemisch wird durch Destillation in unterschiedliche Siedebereiche (*Fraktionen*) zerlegt. Reicht eine einfache Destillation nicht aus, wird durch wiederholtes Überführen in die Dampfphase und anschließendes Kondensieren (*Rektifikation*) ein hoher Reinheitsgrad der Komponenten erzielt. Aus festen Gemischen kann eine Komponente durch *Extrahieren* mit einem selektiv wirkenden Lösungsmittel herausgezogen werden. Auch durch *Adsorption*, also Bindung einer Gemischkomponente infolge Oberflächenkräften an ein Adsorbens oder durch chemische Reaktion mit dem Adsorptionsmittel, lassen sich einzelne Komponenten gewinnen. Auch die Herstellung von Gemischen (vgl. 1.6.3.) sowie Energieab- und -zuführung (z. B. Kühlen und Wärmen) sind zur Durchführung vieler Prozesse notwendig. Schließlich sind für den chemisch-technologischen Prozeß Transportvorgänge verschiedener Art außerordentlich wichtig.

4.1. Chemische Reaktionen

Die Systematisierung chemischer Reaktionen kann von unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgehen. Die nachfolgend genannten Reaktionstypen sind nur eine Auswahl.

4.1.1. Oxydation – Reduktion

Redox-Vorgang. Unter *Oxydation* versteht man einen Vorgang, bei dem ein Atom oder Ion ein Elektron oder mehrere Elektronen abgibt. Nimmt ein Atom oder Ion dagegen Elektronen auf, so heißt der Vorgang *Reduktion*. Da Elektronen von einem Teilchen nur aufgenommen werden können, wenn ein anderes diese liefert bzw. abgibt, sind Oxydations- und Reduktionsprozesse stets gekoppelt. Der Gesamtvorgang heißt daher *Redox-Vorgang*.

Die *Verbrennung* ist ein Spezialfall des Redox-Vorgangs. Als Oxydationsmittel tritt meist

Sauerstoff auf, und der Vorgang verläuft exotherm, es wird Energie freigesetzt. Das entspricht der früheren Definition, wonach die Sauerstoffaufnahme als Oxydation, die Sauerstoffabgabe als Reduktion bezeichnet wurde. Verbrennungsvorgänge werden zur Energieerzeugung genutzt (vgl. 2.1.1.).

4.1.2. Neutralisation

Unter *Neutralisation* versteht man die Reaktion zwischen einer Säure und einer Base, wobei Salz und Wasser entstehen. Die wesentliche Reaktion ist dabei die Vereinigung der *Hydroniumionen* – vereinfacht Wasserstoffionen oder Protonen genannt – der Säure mit den *Hydroxidionen* der Base:

$$H_3O^+ + OH^- \rightleftharpoons 2H_2O.$$

Saure und basische Wirkung heben sich auf, die Lösung reagiert neutral, wenn äquivalente Mengen von beiden vorliegen. Für viele chemische und biochemische Prozesse ist die Einhaltung eines bestimmten Verhältnisses zwischen H_3O^+ und OH^-, angegeben als *p*H-Wert, Bedingung. Durch Mischen von schwachen Säuren bzw. Basen mit einem ihrer Salze erhält man *Pufferlösungen*. Sie haben einen definierten *p*H-Wert und halten ihn auch bei geringerem Säure- oder Basezusatz konstant.

4.1.3. Addition und Substitution

Die *Addition* beruht auf dem Vorhandensein ungesättigter Bindungen, an die ein anderes Molekül unter Aufspaltung der Bindung angelagert werden kann:

$$CH_2 = CH_2 + Br_2 \rightarrow CH_2Br{-}CH_2Br.$$

Ihre Umkehrung ist die *Eliminierung*. Aus einem größeren Molekül wird ein kleines abgespalten.

Bei der *Substitution* wird ein Atom oder eine Atomgruppe durch ein anderes Atom oder einen Molekülrest ersetzt.

Diese Grundreaktionen, die vor allem bei organisch-chemischen Prozessen von großer Bedeutung sind, können nach dem Reaktionsmechanismus oder nach der stofflichen Umsetzung weiter unterteilt werden.

Als *Chlorierung* bezeichnet man die Einführung von Chlor in ein Molekül. Die Chlorisierungsprodukte werden vorwiegend als reaktionsfähige Zwischenstoffe verwendet.

Substituiert man ein Atom durch die Nitrogruppe $-NO_2$, so spricht man vom *Nitrieren*. Dazu verwendet man ein Gemisch aus konzentrierter Schwefel- und Salpetersäure, *Nitriersäure* genannt. Durch Nitrierung bringt man Sauerstoff in das Molekül, der bei hohem Nitrierungsgrad zur Oxydation der Kohlenstoff- und Wasserstoffatome ausreicht, so daß eine Verbrennung ohne Luftsauerstoff erfolgen kann.

Um organische wasserunlösliche Stoffe in Wasser lösen zu können, wird eine *Sulfonierung* durchgeführt. Dabei wird in das Molekül die Gruppe $-SO_3H$ eingebracht.

4.1.4. Veresterung und Verseifung

Als *Veresterung* bezeichnet man die Umsetzung zwischen einer Säure und einem Alkohol, wobei sich ein *Ester* und Wasser bilden. Die Umkehrung ist die *Verseifung*:

$$C_2H_5OH + HOOC{-}CH_3 = C_2H_5O{-}OC{-}CH_3 + H_2O.$$

Beide Vorgänge sind bedeutungsvoll, entweder für die Herstellung von Estern oder zur Spaltung von natürlichen Estern, um deren Bestandteile zu erhalten.

Polymerisation, Polykondensation vgl. 4.10.1.

4.2. Schwefel und wichtige anorganische Schwefelverbindungen

4.2.1. Vorkommen und Gewinnung von Schwefel

Schwefel kommt elementar und gebunden vor. Elementaren Schwefel findet man in vulkanischen Gebieten von Italien, Spanien, Japan, Nordamerika und in der UdSSR. Gebunden liegt Schwefel in sulfidischen Erzen (Eisenkies, Bleiglanz, Zinkblende) oder in Sulfaten (Gips, Kieserit) vor. Die Lebewesen und biogen entstandenen Mineralien enthalten organisch gebundenen Schwefel.

Gewinnung von Schwefel aus elementaren Vorkommen geschieht durch Ausschmelzen aus

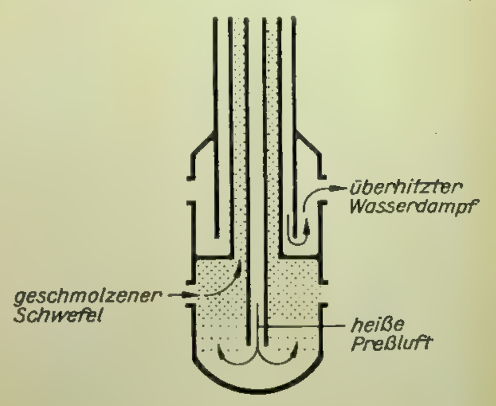


Abb. 4.2.1-1 Fußteil der Fraschpumpe

schwefelhaltigem Gestein. Bergmännisch abgebautes Schwefelgestein wird in Meilern (Calceroni) ausgeschmolzen. Der auf dem Meilerboden liegende Schwefel wird entzündet und die Verbrennungswärme schmilzt den Schwefel im Gestein. In Nordamerika liegen die schwefelhaltigen Gesteine in 300 m Tiefe unter Schwemmsandschichten. Der Schwefel wird dort nach dem *Frasch-Verfahren* gewonnen. Ein System von 3 ineinander gesetzten Röhren wird in die schwefelführenden Schichten gebohrt, überhitzter Wasserdampf eingeleitet und die dadurch entstehende Schwefelschmelze mit Preßluft zutage gefördert (Abb. 4.2.1-1).
Steigende Bedeutung erlangt die Erzeugung von Schwefel aus dem bei der Entgasung und Vergasung von Kohle und bei der Erdölverarbeitung entstehenden Schwefelwasserstoff (H_2S). Nach dem *Claus-Verfahren* wird der Schwefelwasserstoff katalytisch zu Schwefel und Wasser oxydiert. Eine wärmetechnisch günstige Lösung ist der „neuere Claus-Prozeß". Ohne Katalysator wird H_2S zu Schwefeldioxid SO_2 verbrannt und, mit der doppelten Menge H_2S vermischt, am Kontakt umgesetzt.
Benötigt wird elementarer Schwefel vor allem zur Vulkanisation von Kautschuk und Herstellung von Schwefelverbindungen.

4.2.2. Erzeugung von Schwefeldioxid

Die Gewinnung von Schwefeldioxid SO_2 hängt von der Art der Schwefelvorkommen ab. In den USA, die 80 % der Weltproduktion an elementarem Schwefel erzeugen, gewinnt man SO_2 durch Verbrennen von Schwefel in feststehenden oder rotierenden Röhrenöfen:
$S + O_2 \rightarrow SO_2$.
Aus Sulfiden erhält man SO_2 durch den *Röstprozeß*, wobei vorwiegend Pyrit verwendet wird. Durch Erhitzen unter Luftzufuhr bildet sich SO_2 und das entsprechende Metalloxid:
$4\,FeS_2 + 11\,O_2 \rightarrow 2\,Fe_2O_3 + 8\,SO_2$.
Das Rösten führt man in Drehrohröfen oder Etagenröstöfen durch (Abb. 4.2.2-1).
In zunehmendem Maße wird SO_2 nach dem *Müller-Kühne-Verfahren* im Drehrohrofen aus vorgetrocknetem Gips $CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$ oder Anhydrit $CaSO_4$ unter Zusatz von Kohle, Ton und Sand hergestellt. Außer SO_2 bildet sich ein *Zementklinker*, der, zu Zement verarbeitet, das Verfahren wirtschaftlich macht (vgl. 6.1.4.).
In ähnlicher Weise erhält man aus dem im Kalibergbau anfallenden Kieserit $MgSO_4 \cdot H_2O$ im Etagenofen SO_2. Das als Nebenprodukt entstehende Magnesiumoxid verwendet man zur Herstellung von Sorelzement für Steinholzfußböden.
Um den weiter steigenden Bedarf an SO_2 zu decken, werden auch alle anderen schwefelhaltigen Roh- und Abfallstoffe zu seiner Gewinnung genutzt. Besonders die sulfidischen Erze und die

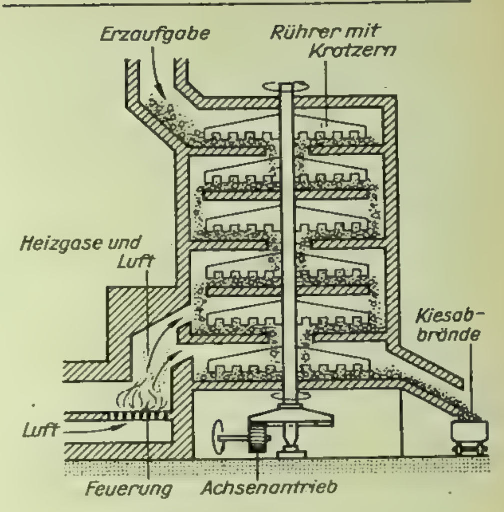


Abb. 4.2.2-1 *Etagen-Röstofen*

bei der Verarbeitung von Kohle und Erdöl entstehenden Industrie- und Abgase sind hier zu nennen.
Reinigung des SO_2. In Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren enthält SO_2 staubförmige und flüchtige Beimengungen, die vor der Verarbeitung entfernt werden müssen. Häufig genügt die Entstaubung. Dazu leitet man das Gas durch *Flugstaubkammern*, in denen sich die Staubteilchen infolge der vielen Prallwände absetzen. In ähnlicher Weise wirkt der *Zyklon*. Eine besonders wirkungsvolle Entstaubungsmethode ist die *Elektrofiltration* (Abb. 4.2.2-2). An einer Sprühelektrode werden die Staubpartikeln negativ geladen, an der geerdeten Wand abgeschieden und mechanisch entfernt.
Für das Kontaktverfahren bestimmtes SO_2 muß besonders gut gereinigt werden, weil die Beimengungen als Kontaktgifte wirken. Das erreicht

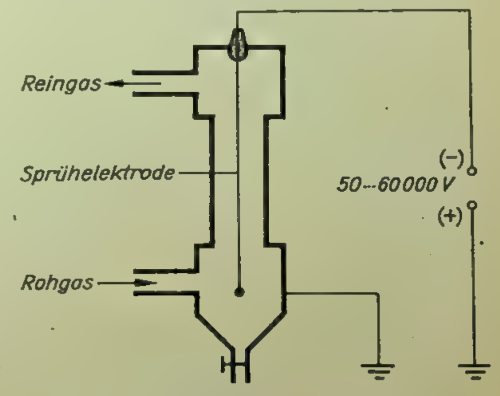


Abb. 4.2.2-2 *Elektrofilter nach Cotrell*

man durch mehrfache Elektrofiltration im Wechsel mit naßmechanischen und -chemischen Reinigungsverfahren.

4.2.3. Gewinnung von Schwefelsäure

Nitroseverfahren. Das *Turmverfahren* als moderne Variante des *Bleikammerverfahrens* verwendet zur Oxydation von SO_2 nitrose Gase NO/NO_2, die aus Salpetersäure gewonnen werden:

$$SO_2 + NO_2 \rightarrow SO_3 + NO$$
$$2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2.$$

Im *Denitrierturm (Gloverturm)* reagiert die aus dem *Absorptionsturm* stammende Nitrosylschwefelsäure (nitrose Säure) mit dem heißen Röstgas zu Gloversäure (78%ige Schwefelsäure) und Stickstoffmonoxid. Letzteres wird durch den Luftsauerstoff zu Stickstoffdioxid umgesetzt und mit den nicht verbrauchten Röstgasen in die *Produktionstürme* überführt. Dort werden sie mit nitroser Säure und Wasser berieselt, und die entstehende 60%ige Schwefelsäure wird aufgefangen. Das gleichzeitig gebildete NO wird im *Oxydationsturm* zu NO_2 oxydiert und gelangt in den Absorptionsturm, wo es mit Gloversäure zu nitroser Säure gebunden wird (Abb. 4.2.3-1).

Kontaktverfahren. Als Oxydationsmittel dient Luftsauerstoff. Der ablaufende Vorgang ist eine Gleichgewichtsreaktion:

$$2\,SO_2 + O_2 \rightleftharpoons 2\,SO_3.$$

Die Gleichgewichtslage hängt von der Gaszusammensetzung und von der Reaktionstemperatur ab, die Druckabhängigkeit ist hier wegen der geringen Volumenänderung von untergeordneter Bedeutung. Nach dem Prinzip von *Le Chatelier* und dem Massenwirkungsgesetz ist die SO_3-Ausbeute bei relativ niedrigen Temperaturen, erhöhter Sauerstoffkonzentration und raschem Entzug des gebildeten SO_3 hoch. Die bei niedrigen Temperaturen geringe Reaktionsgeschwindigkeit wird mittels Katalysatoren erhöht. Die Katalysatoren sind ab ≈ 400 °C wirksam.

Das Synthesegas, ein Gemisch aus hochgereinigtem SO_2 und einem Sauerstoffüberschuß, wird mit der erforderlichen Temperatur in den Kontaktofen geleitet. Als Kontaktmasse wird Vanadinpentoxid V_2O_5 auf Kieselgur verwendet; der Katalysator wird in fester Form (*Kontakt*) eingesetzt. Das entstandene SO_3 wird aus dem Gleichgewicht entfernt und das Restgas einer zweiten Kontaktstufe zugeführt. Dadurch wird eine Ausbeute bis zu 99 % erzielt und die Verunreinigung der Luft durch die Abgase auf ein Minimum reduziert (Abb. 4.2.3-2).

Die Absorption des Schwefeltrioxids an Wasser ist technisch nicht durchführbar. Man verwendet als Absorptionsmittel konzentrierte Schwefelsäure, die in Absorptionstürmen dem gekühlten SO_3-Gas entgegenrieselt. Das SO_3 reagiert mit der Schwefelsäure zu *Oleum*, einem Gemisch von Polyschwefelsäuren. Durch Zusatz berechneter Mengen Wasser erhält man sehr reine und konzentrierte Schwefelsäure:

$$H_2SO_4 + 2\,SO_3 \rightarrow H_2S_3O_{10}$$
$$H_2S_3O_{10} + 2\,H_2O \rightarrow 3\,H_2SO_4.$$

Die Hauptverbraucher der Schwefelsäure sind Düngemittelindustrie, Textilindustrie und Metallurgie.

4.2.4. Wichtige Schwefelverbindungen

Natriumsulfat kommt in der Natur vorwiegend in den Kalisalzlagerstätten in Form von Doppelsal-

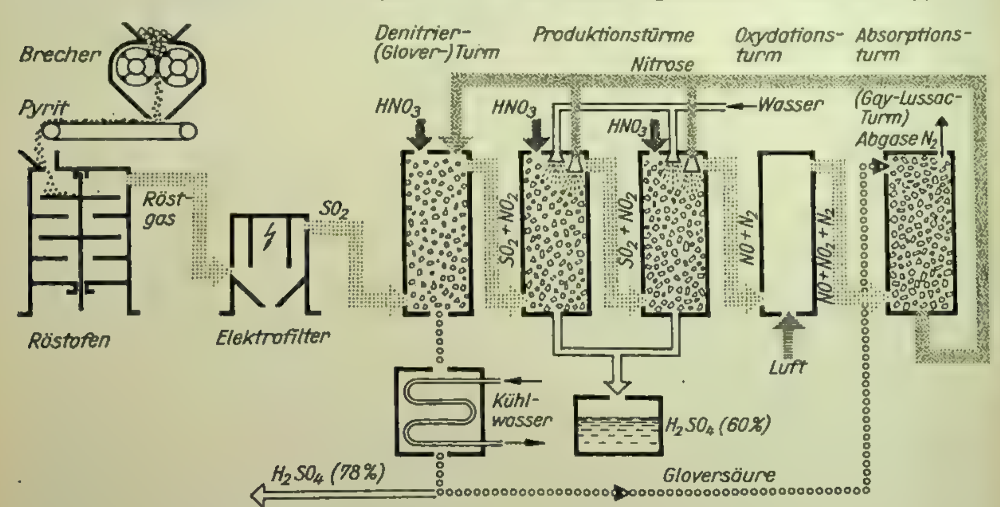


Abb. 4.2.3-1 Schwefelsäure-Turmverfahren

zen vor. Es wird zumeist aus Steinsalz NaCl und Kieserit (Magnesiumsulfat $MgSO_4$) hergestellt. Beide Ausgangsstoffe fallen bei der Kalisalzgewinnung an. Aus der wäßrigen Lösung beider Salze kristallisiert unterhalb 32 °C das *Glaubersalz* $Na_2SO_4 \cdot 10\, H_2O$ aus. Es wird zum Appretieren von Baumwollgewebe, in der Färberei, Kältetechnik und Medizin verwendet. Das wasserfreie Salz dient zum Trocknen organischer Lösungsmittel und zur Herstellung anderer Natriumsalze. Weitere Verbraucher sind die Zellulose- und Glasindustrie.

Natriumsulfit Na_2SO_3 erhält man durch Einleiten von SO_2 in wäßrige Natriumkarbonatlösung. Verwendet wird es bei der Zellulosegewinnung, in fotografischen Entwicklern zur Verhütung vorzeitiger Oxydation, zur Konservierung und in der Kesselspeisewasseraufbereitung.

Natriumsulfid Na_2S wird technisch durch Reduktion von Natriumsulfat mit Koks gewonnen und vor allem bei der Herstellung von Schwefelfarben und in der Gerberei als Enthaarungsmittel eingesetzt.

Natriumthiosulfat $Na_2S_2O_3$ fällt als Nebenprodukt bei der Schwefelfarbstoffgewinnung an. Es wird als Fixiersalz, in der Chlorbleicherei zur Beseitigung der Chlorreste (Antichlor) und in der Silbererzaufbereitung zum Lösen von Silberchlorid verwendet.

Schwefelkohlenstoff oder **Kohlendisulfid** CS_2 ist eine feuergefährliche und giftige Flüssigkeit, die durch Überleiten von Schwefeldampf über getrocknete Kohle in gußeisernen, mit Keramik ausgekleideten Retorten hergestellt wird. Da die Bildung von CS_2 endotherm verläuft, werden die Retorten von außen beheizt. Kohlendisulfid wird vor allem zur Produktion von Viskosekunstseide und Zellwolle benötigt. Außerdem ist es ein ausgezeichnetes Lösungsmittel für Fette, Harze, Wachse, Kautschuk und Kampfer.

4.3. Stickstoffverbindungen

4.3.1. Ammoniak

Ammoniak NH_3 ist ein farbloses Gas mit charakteristischem, stechendem Geruch. Es läßt sich zu einer farblosen, leicht beweglichen Flüssigkeit verdichten. Beim Verdampfen nimmt es die Wärmemenge von 1 370 kJ/kg auf, worauf seine Verwendung in Kältemaschinen beruht. NH_3 löst sich in Wasser leicht auf, wobei 1 ℓ Wasser bei 20 °C ≈ 700 ℓ NH_3 absorbiert. Das *Ammoniakwasser* reagiert schwach basisch.

In der Natur kommen nur Ammoniumsalze vor. Bei der Zersetzung organischen, stickstoffhaltigen Materials bildet sich Ammoniumkarbonat.

Abb. 4.2.3-2 *Schwefelsäure-Kontaktverfahren*

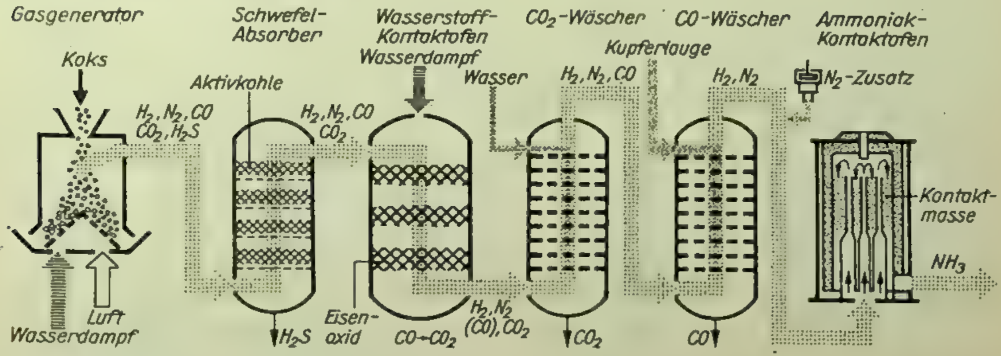


Abb. 4.3.1-1 *Schema der Ammoniaksynthese*

Aus vulkanischen Gasen schlägt sich an den Kraterrändern Ammoniumchlorid nieder. Da schwerflüchtige Basen NH_3 aus seinen Salzen vertreiben, wird es so laboratoriumsmäßig in kleinen Mengen hergestellt. Außerdem entsteht Ammoniak bei der Verschwelung, Entgasung und Verkokung von Kohle sowie bei der Erdölverarbeitung. Großtechnisch wird NH_3 nach dem *Haber-Bosch-Verfahren* (Abb. 4.3.1-1) gewonnen, das in 4 Stufen abläuft.

1. Stufe. Synthesegasherstellung. Hierbei wird ein Stickstoff-Wasserstoff-Gemisch im Volumenverhältnis 1:3 erzeugt. Das entspricht der Reaktionsgleichung $N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$.

Ausgangsstoffe für das Synthesegas sind Luft und Wasser. Der beigemischte oder gebundene Sauerstoff wird durch Reduktionsmittel, wie Kohle, Erdöl, Erdgas oder deren Verarbeitungsprodukte, entzogen.

$$4\,N_2 + O_2 + C \rightarrow 4\,N_2 + CO_2$$

Luft Generatorgas

$$H_2O + C \rightarrow H_2 + CO$$

Wassergas

Die Reaktionen laufen in Generatoren ab, z. B. dem *Winkler-Generator*, wobei man durch Kopplung beider Vorgänge eine wärmetechnische Optimierung anstrebt.

2. Stufe. Gasreinigung. In dieser Verfahrensstufe werden Bestandteile aus dem Gas entfernt, die als Verdünnung, Kontaktgift oder Korrosionsmittel wirken. Nach der Entstaubung wird der Schwefelwasserstoff mit Aktivkohle entfernt. Bei der nachfolgenden *Konvertierung* des Gases kommt es zur katalytischen Umwandlung des CO in CO_2. Das CO wird im *Wasserstoffkontaktofen* durch Wasserdampf an Eisenoxidkontakten oxydiert.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Dabei reichert sich das Mischgas an H_2 und CO_2 an.

3. Stufe. Druckwäsche. Nach Kühlung wird das Gas auf ≈ 3 MPa komprimiert und das CO_2 in Waschtürmen durch eingesprühtes Wasser entfernt. In der *Feinreinigung* werden bei einem Druck von ≈ 20 MPa die restlichen Verunreinigungen ausgewaschen. Das nur noch aus Stickstoff und Wasserstoff bestehende Gas wird auf das stöchiometrische Verhältnis gebracht (Zusatz von Stickstoff) und steht als Synthesegas bereit.

4. Stufe. Synthese. Die Umsetzung des Gases zu NH_3 wird als katalytische Hochdruckreaktion durchgeführt, weil bei hohem Druck und niedriger Temperatur die Reaktionsbedingungen günstig sind. Zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit verwendet man Eisenoxidkatalysatoren mit Zusätzen von Al_2O_3 und K_2O. Bei Arbeitstemperaturen zwischen 450 und 500 °C und einem Druck von ≈ 30 MPa liegen nur ≈ 20 % NH_3 vor. Das gebildete Ammoniak wird rasch aus dem Gleichgewicht entfernt, so daß es sich immer wieder einstellen muß.

Der Hochdruckmantel des Kontaktofens besteht wegen der aggressiven Gase aus Chromnikkelstahl. Das einströmende Synthesegas wird durch die Reaktionswärme der NH_3-Bildung vorgewärmt. Im ausströmenden Gas wird NH_3 nach Abkühlung mittels Druckverflüssigung dem Gleichgewicht entzogen und als flüssiges NH_3 oder als Ammoniakwasser gelagert. Die überwiegende Menge des Ammoniaks wird für Düngezwecke verwendet. Nur etwa ein Fünftel wird für technische Produkte, wie Salpetersäure, Plaste und Pharmazeutika, und als Hilfsstoff gebraucht.

4.3.2. Harnstoff

Harnstoff ist das Diamid der Kohlensäur mit der Formel $NH_2—CO—NH_2$. In der Natur kommt er als Stoffwechselendprodukt im Harn der Säugetiere vor. Wegen seines hohen Stickstoffgehalts ist er als Stickstoffdüngemittel, Viehfutterzusatz und für die Herstellung von Aminoplasten bedeutungsvoll.

Die technische Gewinnung im Autoklaven verläuft unter Druck aus CO_2 und NH_3. Das primär gebildete Ammoniumkarbamat geht dann bei 150 °C und 10 MPa unter Wasserabspaltung in Harnstoff über.

4.3.3. Salpetersäure

Reine Salpetersäure HNO_3 ist eine wasserklare Flüssigkeit, die stark oxydierend und ätzend wirkt. Etwa 75 % der Weltproduktion werden für Düngemittel verarbeitet. Der Rest wird zur Herstellung von Sprengstoffen und zum Nitrieren verwendet.

Gewinnung von Salpetersäure erfolgt nach dem *Ostwald-Verfahren*, das sich aus der Ammoniakverbrennung, der Oxydation des Stickoxids und der Absorption zusammensetzt.

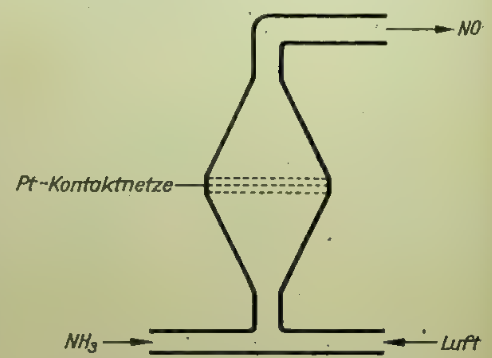


Abb. 4.3.3-1 *Ammoniak-Verbrennungsofen*

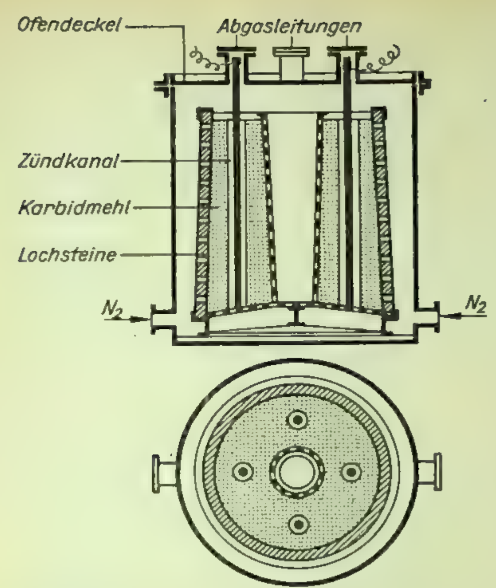


Abb. 4.3.4-1 Azotierofen nach Frank-Caro mit mehreren im Kreis angeordneten Zündkanälen (für ≈ 6 t Kalkstickstoff)

Die Ammoniakverbrennung erfolgt nach der Gleichung

$$4NH_3 + 5O_2 \rightleftharpoons 4NO + 6H_2O.$$

Bei Normaldruck, Temperaturen von 630 bis 730 °C, einer Verweilzeit am Kontakt von 0,0002 s und optimaler Gaszusammensetzung beträgt die Ausbeute an NO ≈ 96 %.
Das flüssige NH_3 wird in einem Wärmeaustauscher verdampft, mit entstaubter Luft gemischt und im Kontaktofen am netzförmigen Platin-Rhodium-Kontakt umgesetzt (Abb. 4.3.3-1). 2 000 Maschen je Quadratzentimeter verleihen dem Netz eine große Oberfläche.
Die Oxydation des NO zu NO_2 und dessen Absorption und Umsetzung zu HNO_3 lassen sich vereinfacht wie folgt beschreiben:

$$2\,NO + O_2 \rightleftharpoons 2\,NO_2$$
$$3NO_2 + 2H_2O \rightleftharpoons 4HNO_3 + NO.$$

Das gekühlte NO wird einer aus ≈ 10 Türmen bestehenden Anlage zugeführt. Im ersten Turm findet die Oxydation statt, und es wird 50%ige HNO_3 entnommen. In den folgenden mit Füllkörpern ausgestatteten Türmen wird im Gegenstrom – dem aufsteigenden Gas rieselt verdünnte Salpetersäure entgegen – absorbiert. Die Salpetersäure hat eine von Turm zu Turm abnehmende Konzentration, dem letzten Turm wird Wasser zugeleitet.
Zur Konzentrierung destilliert man unter Zusatz konzentrierter Schwefelsäure, die durch ihre Hygroskopizität das Wasser bindet. Die Destillation wird nur für solche Zwecke durchgeführt, bei denen 50%ige Säure nicht genügt.

Die Salze der Salpetersäure, die Nitrate, werden wegen ihrer Beständigkeit oft anstelle der freien Säure verwendet und wirken wie diese als Oxydationsmittel.

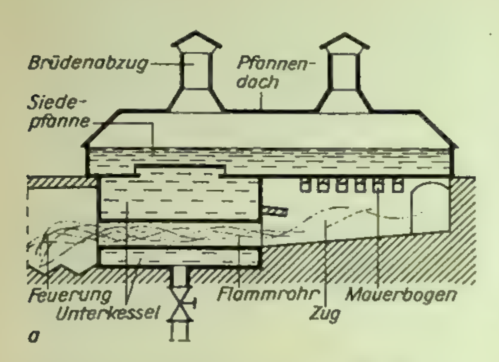
4.3.4. Kalziumzyanamid

Kalziumzyanamid $CaCN_2$ ist ein wichtiges Düngemittel. Es dient aber auch als Zwischenstoff zur Herstellung organischer Stickstoffverbindungen.
Feingemahlenes Kalziumkarbid CaC_2 wird in einem *Azotierofen*, einem senkrechten Röhrenofen, erhitzt und mit Stickstoff umspült (Abb. 4.3.4-1). Es muß nur ein Teil des Karbids erhitzt werden, die Reaktionswärme sorgt für die Aufheizung des übrigen Karbids. Bei der Reaktion sintert das Gut zu einem harten Block. Es wird feingemahlen und als *Kalkstickstoff* zur Düngung verwendet.

4.4. Kochsalz und Soda

4.4.1. Gewinnung von Kochsalz

Kochsalz (Natriumchlorid NaCl) ist für Ernährungszwecke unentbehrlich, aber auch als Ausgangsstoff für die Gewinnung vieler technisch wichtiger Stoffe von großer Bedeutung.
In der Natur kommt es als *Steinsalz* in Salzlagerstätten (z. B. Staßfurt, Halle) oder als Seesalz im Weltmeer und manchen Binnenseen vor. Steinsalz wird bergmännisch abgebaut und gemahlen. Ist ein höherer Reinheitsgrad erforderlich, wird das zerkleinerte Steinsalz in Teichen gelöst. Die wäßrige Lösung heißt *Sole*. Sie kann auch in der Lagerstätte hergestellt und zutage gepumpt werden. Salzquellen liefern natürliche Sole.
Die Solen werden durch Ausfällung von Fremdsalzen und organischen Beimengungen gereinigt und in flachen, eisernen Pfannen eingedampft (Abb. 4.4.1-1). Je nach Eindampftemperatur kann man verschieden große Salzkristalle erhalten. Bei dauerndem Sieden gewinnt man das feinkristalline *Siedesalz*, bei niedrigen Temperaturen gröbere Kristalle. In Zentrifugen wird das Salz von anhaftender Sole befreit und dann in Trockentrommeln getrocknet.
Das Siedesalz enthält ≈ 93 % NaCl. Zusätze erhöhen die Bekömmlichkeit oder erzielen medizinische Wirkungen, z. B. dient die Beimischung von Kaliumjodid zur Vorbeugung von Kropfbildung bei Jodmangel.
Aus Meerwasser läßt sich nach Verdunsten des Wassers in flachen Strandteichen ebenfalls Speisesalz gewinnen.



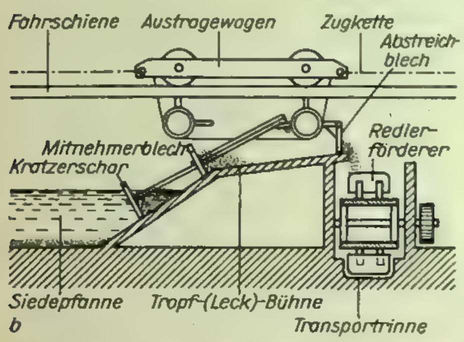


Abb. 4.4.1-1 *a Salz-Siedepfanne (Unterkesselpfanne), b mechanische Austragevorrichtung*

Früher konzentrierte man die Sole in *Gradierwerken.* Das sind freistehende Reisigwände aus Schwarzdorn, über die die Sole rieselte und dabei Wasser verdampfte. Gradierwerke betreibt man heute nur noch in Kurorten, um die Heilwirkung salzhaltiger Luft zu nutzen.

Als *Vieh- oder Tausalz* wird ein durch Eisenoxid vergälltes Grobsalz verbilligt gehandelt. Für die menschliche Ernährung ist es nicht zu verwenden.

4.4.2. Gewinnung von Soda

Die Soda Na_2CO_3 ist in wasserfreier Form ein weißes Pulver. Als Kristallsoda, $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$, bildet sie farblose Kristalle, die an der Luft infolge Kristallwasserabgabe etwas verwittern. Beide Formen sind in Wasser leicht löslich. Die Lösung reagiert alkalisch.

Die natürliche Soda, die aus manchen Böden auswittert oder aus sog. Sodaseen gewonnen wurde, konnte schon seit Ende des 18. Jahrhunderts den Bedarf nicht mehr decken. Großverbraucher an Soda sind die Glasindustrie, Textilveredlung, Seifen- und Waschmittelindustrie, Zellstoff- und Papierindustrie und die chemische Industrie. Beträchtliche Mengen werden auch zur Erzaufbereitung, Entschwefelung des Roheisens und Aufbereitung des Wassers benötigt.

Das 1791 von *Leblanc* entwickelte Gewinnungsverfahren ist nur noch von historischem Interesse. Durch die Vielfalt der notwendigen chemischen und physikalischen Prozesse initiierte es die Entwicklung der chemischen Industrie, der Verfahrenstechnik, des Anlagen- und Maschinenbaus.

Heute wird die Soda nach dem *Ammoniak-Soda-Prozeß*, der 1863 von *Solvay* entwickelt wurde, hergestellt. Die Ausgangsstoffe dafür sind Ammoniak, Kochsalz und Kalkstein $CaCO_3$.

Durch Auflösen von NH_3, NaCl und aus dem Kalkstein gewonnenen Kohlendioxid CO_2 bilden sich in wäßriger Lösung verschiedene Ionen.

$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$$
$$CO_2 + H_2O \rightarrow H^+ + HCO_3^-$$
$$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$$

Wasserstoff- und Hydroxidionen vereinigen sich zu Wasser, so daß nur 4 Ionen übrigbleiben. Liegen in einer Lösung jedoch mehrere kombinierfähige Ionen vor, so bildet sich das Salz, dessen Löslichkeit am geringsten ist. Aus diesem Grunde setzen sich die Ionen nach der folgenden Gleichung um:

$$NH_4^+ + Na^+ + HCO_3^- + Cl^- \rightarrow$$
$$NaHCO_3 + NH_4^+ + Cl^-.$$

Das ausfallende Natriumhydrogenkarbonat $NaHCO_3$ wird durch Erhitzen in Soda umgewandelt.

Technische Darstellung (Abb. 4.4.2-1). Der Rohsole werden Kalkmilch und Soda zugegeben. Dadurch bilden sich unlösliche Kalzium- und Magnesiumverbindungen, die ausfallen und in Filterpressen von der Sole getrennt werden.

Die Reinsole wird in *Pasettenapparaten*, turmartigen Aggregaten mit Zwischenböden, mit NH_3 gesättigt. Die ammoniakalische Sole leitet man in Fälltürme oben ein. Während die Sole über Zwischenböden nach unten fließt, wird entgegenströmendes CO_2 absorbiert. Die auftretende Reaktionswärme wird durch Kühlen abgeführt. In den unteren Kammern des Fällturms scheidet sich das Natriumhydrogenkarbonat ab. Fällt man bei 60 °C, so erhält man ein grobkörniges und gut filtrierbares Pulver. Das den Fällkammern entnommene $NaHCO_3$ wird in leistungsfähigen Zentrifugen oder Drehfiltern von der mitgeschleppten Sole getrennt und mit wenig Wasser nachgewaschen. Im *Drehrohrofen* wird dem Hydrogenkarbonat durch Erhitzen auf 170 bis 180 °C das Wasser entzogen (Kalzinieren):

$$2\,NaHCO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$$

Die Filterlauge enthält noch Ammoniumchlorid und nicht ausgefallenes $NaHCO_3$. Das in diesen Salzen gebundene Kohlendioxid und Ammoniak wird zurückgewonnen. Das Ammoniumchlorid wird durch Kalkmilch zersetzt:

$$2NH_4Cl + Ca(OH)_2 \rightarrow 2NH_3 + 2H_2O + CaCl_2.$$

Das freigesetzte NH_3 wird dem Prozeß wieder zugeführt.
Kaliumkarbonat (Pottasche) K_2CO_3 wird durch Einleiten von Kohlendioxid in Kalilauge und anschließendes Eindampfen der Lösung hergestellt. Verwendet wird Pottasche vorwiegend zur Herstellung von Kaligläsern und Schmierseife sowie zur Gewinnung anderer Kaliumsalze.

4.5. Chlor und anorganische Chlorverbindungen

4.5.1. Bedeutung der Chlorproduktion

Vor wenigen Jahrzehnten wurde Chlorgas vor allem zum Bleichen von textilen Fasern und Zellstoff verwendet. Das in der chemischen Industrie bei der Alkalichloridelektrolyse anfallende Chlor wurde nur z. T. gebraucht und vorwiegend als lästiges Nebenprodukt betrachtet, das wegen seiner chemischen Aggressivität nicht ohne weiteres in die Luft abgeblasen werden konnte. Heute ist Chlor ein begehrtes Produkt, das in großen Mengen von der organisch-chemischen Industrie benötigt wird. Die Elektrolyse von Alkalichloriden führt man heute in erster Linie wegen der Chlorgewinnung durch.
Chlor wird zur Herstellung von Lösungsmitteln (chlorierte Kohlenwasserstoffe), PVC-Artikeln, Pflanzenschutzmitteln und in der Waschmittel- und Farbstoffindustrie benötigt.

4.5.2. Die Gewinnung von Chlor und Alkalien durch Elektrolyse

Diaphragma-Verfahren. In der Elektrolysezelle dissoziiert das zugesetzte Natriumchlorid NaCl (Abb. 4.5.2-1). An der Anode entsteht beim An-

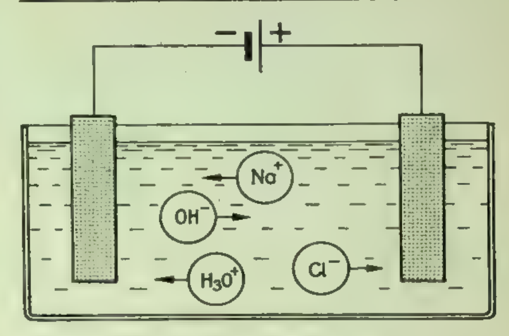


Abb. 4.5.2-1 Prinzip der Elektrolyse einer Natriumchloridlösung

legen einer Gleichspannung Chlor, das aber sekundär wieder reagieren kann. Durch die apparative Gestaltung und optimale Einstellung der Reaktionsbedingungen werden deshalb die Diffusion des Chlors aus dem Anodenraum und die Sekundärreaktion des Chlors verhindert. Der Katodenraum ist vom Anodenraum durch ein *Diaphragma* getrennt. Das ist eine poröse Trennwand (Asbestfasermasse), die zwar den Strom, nicht aber gelöste Stoffe hindurchläßt.
Ein verbreiteter Zellentyp ist die *Billiter-Zelle*, die ein horizontales, auf der Netzkatode ruhendes Diaphragma hat. Eine Weiterentwicklung ist die Zelle mit vertikalem Diaphragma (Bitterfelder Zelle). Durch die senkrecht stehenden Diaphragmen ist die Standfläche der Zelle gering, und das Platz-Produktionsverhältnis liegt sehr günstig (Abb. 4.5.2-2).
Quecksilber- oder Amalgamverfahren. Dieses Verfahren nutzt eine Hemmung der Hydro-

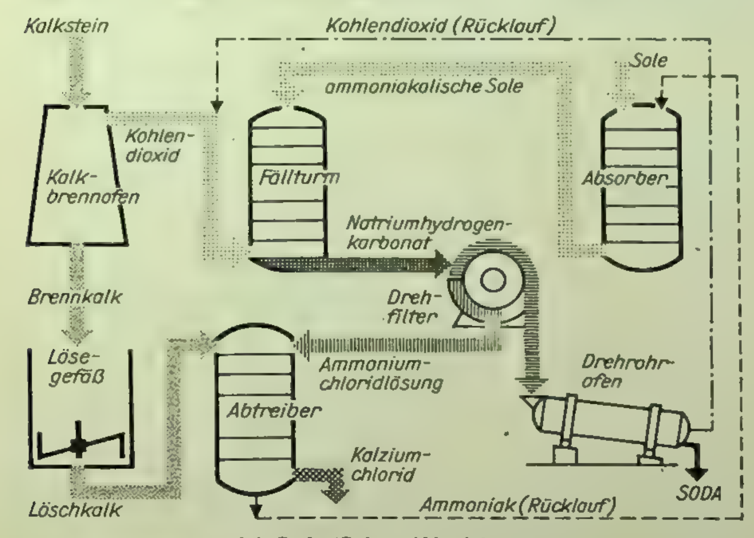
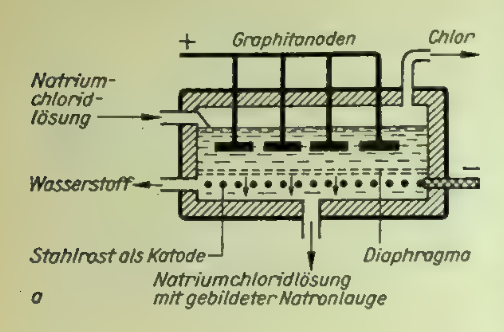
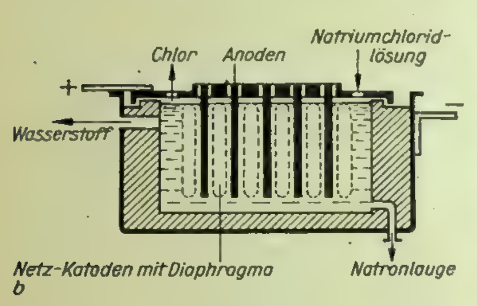


Abb. 4.4.2-1 Ammoniak-Soda-(Solvay-)Verfahren





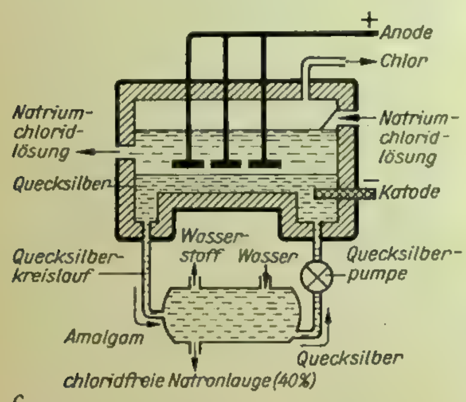


Abb. 4.5.2-2 Natriumchlorid-Elektrolyse: a, b Diaphragmaverfahren, a Biliter-Zelle mit waagerechtem, b Bitterfelder Zelle mit senkrechtem Diaphragma, c Quecksilberverfahren

niumionenentladung an der Quecksilberkatode aus, um die Chlor- und Natronlaugeerzeugung räumlich zu trennen.

An einer Quecksilberelektrode entladen sich Natriumionen Na^+ leichter als Hydroniumionen H_3O^+. Die entstehenden Natriumatome lösen sich im Quecksilber zu sog. Natriumamalgam auf. Das Amalgam wird kontinuierlich entnommen, mit Wasser vermischt und dadurch in Natronlauge und Wasserstoff zerlegt. Die im Amalgamverfahren gewonnene Natronlauge ist sehr rein. Die Anodenreaktion unterscheidet sich prinzipiell nicht von der des Diaphragmaverfahrens.

Elektrolyseendprodukte von wäßrigen Alkalichloridlösungen sind Chlor, Wasserstoff und Alkalilauge.

4.5.3. Salzsäure

Ein Teil des bei der Alkalichloridelektrolyse entstehenden Chlors und Wasserstoffs wird zu Chlorwasserstoff bzw. Salzsäure umgesetzt. In einem Brenner aus Quarzglas wird das Chlor im Wasserstoffstrom verbrannt:

$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl.$

Eine weitere Möglichkeit zur Gewinnung von Chlorwasserstoff ist die Umsetzung von Steinsalz und konzentrierter Schwefelsäure. Durch Auflösen des Chlorwasserstoffgases in Wasser bildet sich Salzsäure HCl. Die konzentrierte Säure enthält 37 bis 40 % HCl. Sie wird vor allem zur Herstellung von Chloriden verwendet und gehört zu den wichtigsten Säuren eines Laboratoriums.

4.5.4. Bleichmittel

Alle Stoffe, die Aufhell- oder Entfärbungseffekte zeigen, nennt man *Bleichmittel*. Das Bleichen kann auf chemischen oder physikalischen Vorgängen beruhen.

Die chemischen Bleichmittel führen auf oxydativen oder reduktiven Wegen zu farblosen Verbindungen oder sie adsorbieren die farbigen Stoffe. Physikalisch wirkende Bleichmittel bezeichnet man als *optische Aufheller*. Sie täuschen dem Auge eine Bleichwirkung vor.

Elementares Chlor wirkt in Gegenwart von Wasser mittelbar oxydativ bleichend. Es bildet sich HCl und unterchlorige Säure HClO, die ihrerseits unter Sauerstoffabspaltung in HCl übergeht. Der Sauerstoff im Zustand des Entstehens ist atomar und oxydiert die farbigen zu farblosen Verbindungen. Die gleichzeitig entstehende Salzsäure greift das Gewebe an und muß durch Spülen entfernt oder in nicht aggressive Verbindungen verwandelt werden (Antichlor).

Als Bleichmittel verwendet man auch sauerstoffhaltige Chlorverbindungen, wie Chlorkalk $CaOCl_2$ und Natriumhypochlorit NaClO. Durch Abspaltung atomaren Sauerstoffs wirken diese Stoffe direkt bleichend.

Peroxide zerfallen leicht unter Abgabe von atomarem Sauerstoff, der die oxydative Farbstoffzerstörung herbeiführt. Ihre Wirkung entspricht im Prinzip der früher üblichen Rasenbleiche.

Es werden vor allem Perborate, Persulfate und Perkarbonate verwendet, die in vielen Waschpulvern enthalten sind.

Optische Aufheller verändern die Struktur der färbenden Verbindungen nicht. Ursprünglich verwendete man bläuliche Farbstoffe (Wäscheblau), die als Komplementärfarbe zu dem gelblich verfärbten Gewebe ein leuchtendes Weiß vortäuschten. Heute verwendet man farblose Verbindungen, die im UV-Bereich absorbieren und dabei bläuliche Fluoreszenz zeigen.

4.5.5. Wichtige Chloride

Aluminiumchlorid $AlCl_3$ wird durch Überleiten von Chlor über erhitztes Aluminium als wasserfreies Salz gewonnen. Es wird vor allem als Katalysator bei organischen Synthesen gebraucht. Durch Auflösen von Al, Al_2O_3 oder $Al(OH)_3$ in Salzsäure und Eindampfen der entstandenen Lösung erhält man das Hexahydrat $AlCl_3 \cdot 6\,H_2O$.
Eisen(III)-chlorid $FeCl_3$ wird u. a. zum Beizen in der Färberei sowie zum Ätzen von Leiterplatten und Tiefdruckzylindern eingesetzt (vg. 17.1.5.). Bei organischen Reaktionen dient es als Halogenüberträger und Katalysator.
Siliziumtetrachlorid $SiCl_4$ wird technisch durch Überleiten von Chlor über Silizium oder Ferrosilizium gewonnen. Es wird vor allem zur Produktion von Silikonen und als Zusatz zu Zement und Farben zur Wetterfestmachung (Imprägnieren) benötigt.

4.6. Phosphor und Phosphorverbindungen

4.6.1. Gewinnung von Phosphor

Phosphor kommt in der Natur in Form von Kalziumphosphaten – Phosphorit und Apatit –, als Begleiter von Eisenerzen und im Guano vor. Er tritt in 3 Modifikationen auf: weiß, rot und schwarz. Davon sind die beiden ersten technisch von Bedeutung. Der weiße, sehr giftige Phosphor wird zur Herstellung von Phosphorverbindungen und für militärische Zwecke verwendet. Reiner roter Phosphor ist ungiftig. Er wird vor allem in der Zündwarenindustrie eingesetzt.
Zur Herstellung von Phosphor werden natürliche Phosphate mit Quarzsand und Koks in einem Schachtofen mittels Lichtbogen auf ≈ 1400 °C erhitzt. Dabei bildet sich elementarer Phosphor (Abb. 4.6.1-1):

$$Ca_3(PO_4)_2 + 3\,SiO_2 + 5\,C \rightarrow$$
$$2\,P + 3\,CaSiO_3 + 5\,CO.$$

Das den Schachtofen verlassende Gasgemisch wird elektrostatisch entstaubt und in Waschtürmen durch Berieseln mit Wasser auf 50 bis 60 °C abgekühlt. Dabei verflüssigt sich der Phosphordampf und wird unter Wasser gesammelt. Durch Destillation unter Luftabschluß wird er gereinigt und zu Stangen vergossen. *Roter Phosphor* wird aus dem weißen durch Erhitzen unter Luftabschluß hergestellt.



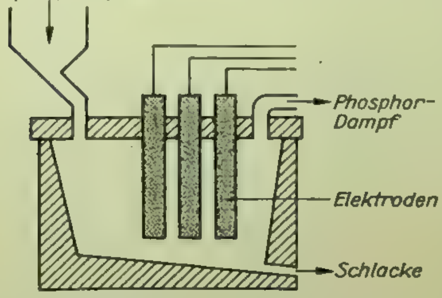


Abb. 4.6.1-1 Elektroofen zur Phosphorgewinnung (Schema)

4.6.2. Gewinnung der Phosphorsäure

Die Phosphorsäure H_3PO_4 (Orthophosphorsäure) bildet in reinem Zustand harte, leicht wasserlösliche Kristalle. Als konzentrierte Phosphorsäure bezeichnet man eine 85- bis 90%ige Lösung von sirupähnlicher Beschaffenheit. Sie dient vor allem zur Herstellung synthetischer Phosphatdünger und in geringerem Umfang auch als Beizmittel und Rostschutz (Phosphatieren).
Reine H_3PO_4 wird durch Verbrennen des Phosphors und Auflösen des so erhaltenen Phosphorpentoxids in Wasser gewonnen. Technisch schließt man die Phosphorsäuregewinnung an die Phosphorherstellung an. Der Phosphor wird im Verbrennungsturm zu P_2O_5 oxydiert. Zur besseren Absorption löst man dieses in ≈ 50%iger Phosphorsäure statt in Wasser. Ein Teil der Säure wird zur weiteren Absorption mit Wasser verdünnt.
Von der Phosphorsäure leiten sich auch die Phosphorsäureester ab. Einige davon werden als Weichmacher in der Plastverarbeitung, andere im Pflanzenschutz als Insektizide eingesetzt. Spezielle Ester der Phosphorsäure mit hoher Giftigkeit wurden als Kampfstoffe verwendet.

4.7. Synthetische Düngemittel

4.7.1. Düngung

Alle Maßnahmen, mit denen dem Boden die entzogenen Stoffe wieder zugeführt werden, nennt man Düngung. Durch die Intensivierung der Pflanzenproduktion reichen natürliche Düngemittel, wie Mist, Jauche und Kompost, nicht aus, so daß die Herstellung synthetischer Dünger

zu den wichtigen Aufgaben der chemischen Industrie zählt.

4.7.2. Stickstoffdünger

Ammoniumsulfat ist der am meisten produzierte Stickstoffdünger. Es wird durch Einleiten von NH_3 und CO_2 in eine Aufschlämmung von feingemahlenem Gips hergestellt. Nach der Filtration von ausgefallenem Kalk dampft man die Lösung ein. Die gebildeten Kristalle von $(NH_4)_2SO_4$ trennt man in Zentrifugen von der Mutterlauge ab. Ammoniumsulfat enthält 21 % N_2. Es kann auch aus dem Gaswasser der Gaswerke und Kokereien gewonnen werden.
Kalkammonsalpeter ist ein Gemisch aus Kalk und Ammoniumnitrat.
Natronsalpeter $NaNO_3$, früher aus dem Chilesalpeter hergestellt, wird heute als Nebenprodukt der Salpetersäureproduktion gewonnen.
Wichtig als Stickstoffdünger ist der *Kalkstickstoff* (vgl. 4.3.4.), der sich im Boden zu Kalk und Ammoniumsalzen zersetzt.

4.7.3. Kalidünger

Kalidünger werden aus den in Salzlagerstätten vorkommenden Kalisalzen hergestellt. Durch Vermahlen der Rohsalze werden *Kainit* und *Karnallit* gewonnen. Ihr Kaligehalt liegt aber nur bei ≈ 12 % K_2O.
Durch Verarbeitung der Rohsalze – Mahlen, Lösen, Eindampfen und Kristallisieren – erhält man kalireichere Salze. Dazu zählen *Kaliumchlorid* und *Kaliumsulfat* mit je ≈ 50 % K_2O. *Kalimagnesia*, eine Mischung aus K_2SO_4 und $MgSO_4$, enthält ≈ 28 % K_2O und ist für chloridempfindliche Pflanzen, wie Kartoffeln, und schwere Böden geeignet.

4.7.4. Phosphordünger

Zur Herstellung von Phosphordüngern sind natürliche Phosphate erforderlich. Rohphosphate sind wasserunlöslich und müssen in wasserlösliche Formen überführt werden. Zur Kennzeichnung der Löslichkeit gibt man den Prozentgehalt von Phosphorpentoxid P_2O_5 an, der in 2%iger Zitronensäure löslich ist.
Superphosphat wird durch nassen Aufschluß mit konzentrierter Schwefelsäure gewonnen:

$$Ca(PO_4)_2 + 2\,H_2SO_4 \rightarrow Ca(H_2PO_4)_2 + 2\,CaSO_4.$$

Es enthält 18 % P_2O_5 in leichtlöslicher Form. Etwa zwei Drittel der Schwefelsäureproduktion werden zur Herstellung von Superphosphat benötigt.
Glühphosphat entsteht durch Erhitzen der mit Sand und Soda vermischten Rohphosphate auf 1 130 bis 1 230 °C. Es hat ungefähr die Zusammensetzung $3\,CaNaPO_4 \cdot Ca_2SiO_4$ und enthält 25 bis 30 % zitratlösliches P_2O_5. Dem Glühphosphat ähnlich ist das *Thomasmehl*, das bei der Stahlerzeugung aus phosphathaltigem Eisen anfällt (vgl. 3.2.2.). Es ist ein dunkelgraues Pulver und enthält 16 bis 20 % P_2O_5.

4.7.5. Kalkdünger

Kalk liefert dem Boden nicht nur Ca^{2+}-Ionen, sondern verbessert die Bodenstruktur und alkalisiert saure Böden. Eingesetzt wird Kalziumkarbonat in Form von gemahlenem *Kalkstein* oder von „*Leunakalk*", der bei der Ammoniumsulfatproduktion anfällt. *Branntkalk* (vgl. 6.1.2.) und der bei der Äthingewinnung entstehende *Löschkalk* $Ca(OH)_2$ sind ebenfalls gute Kalkdünger.
Volldünger sind Düngemittel mit mehreren Komponenten (Mehrstoffdüngung). Wichtige Volldünger sind *Kaliammonsalpeter*, *Nitrophoska*, *Hakaphos* und *Piaphoskan* rot und blau. Piaphoskan blau ist für chlorempfindliche Kulturen geeignet.

4.8. Karbide

4.8.1. Kalziumkarbid

Chemisch reines Kalziumkarbid CaC_2 ist eine farblose und geruchlose, feinkristalline Masse. Das technische Produkt ist grau und besitzt den unangenehmen „Karbid"geruch. Es wird in großen Mengen für die Produktion von Kalkstickstoff und für die Äthinherstellung benötigt. Außerdem wird es als Reduktionsmittel in der Metallurgie verwendet.
Karbidherstellung. Ausgangsstoffe sind Branntkalk und Kohle, die bei hohen Temperaturen umgesetzt werden:

$$CaO + 3\,C \rightleftharpoons CaC_2 + CO.$$

Die optimale Temperatur von 2 100 °C wird im Elektroofen durch elektrische Lichtbogen erzeugt. Die Ausgangsstoffe müssen sehr rein sein, da alle Verunreinigungen in das Karbid eingehen oder den technologischen Ablauf stören. Der Branntkalk muß einen Mindestgehalt von 96 % CaO haben. Die Ausgangsstoffe werden auf 5 bis 15 mm gekörnt und gemischt dem Elektroofen zugeführt (Abb. 4.8.1-1).
Die Öfen bestehen aus einem mit Schamotte ausgekleideten drehbaren Stahlzylinder. Durch die Abdeckung führen 3 Elektroden. Das flüssige CaC_2 wird abgestochen (Tafel 16) und gekühlt. Das Abgas – CO mit etwas H_2 und N_2 – wird als Brenn- und als Synthesegas benutzt. Wegen der

starken Elektrodenabnutzung werden kontinuierliche Elektroden, sog. *Söderberg-Elektroden*, verwendet. Eine Masse aus Anthrazit, Koks, Teer und Pech wird in durch die Abdekkung führende Stahlrohre gepreßt und der Elektrodenabbrand somit laufend ergänzt.

Das Karbid soll 81%ig sein und pro Kilogramm 300 ℓ Äthin im Normzustand liefern.

Äthingewinnung. Im Trockenvergaser wird über das CaC_2 die stöchiometrische Menge Wasser gesprüht und das Äthin sorgfältig von unerwünschten Begleitstoffen – Phosphor-, Schwefel- und Arsenverbindungen – befreit:

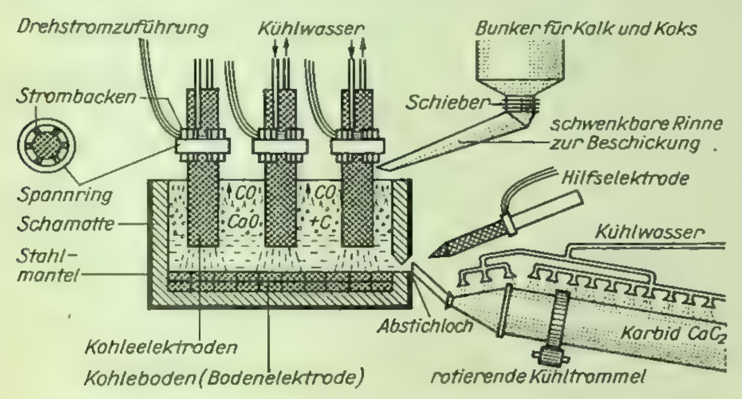


Abb. 4.8.1-1 *Karbidofen*

$$CaC_2 + 2\ H_2O \rightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2.$$

Wird als Ausgangsstoff Erdgas eingesetzt, so zerfällt das Methan bei sehr hohen Temperaturen in Äthin und Wasserstoff:

$$2\ CH_4 \rightarrow C_2H_2 + 3\ H_2.$$

Äthin wird zu organischen Synthesen (vgl. 4.10.4.) und als Brenngas verwendet. In besonderen Brennern werden Temperaturen von über 2700°C erzielt.

4.8.2. Siliziumkarbid

Das Siliziumkarbid SiC ist einer der härtesten Stoffe und dem Diamanten ähnlich. Das technische Erzeugnis nennt man *Karborundum*, es ist durch Verunreinigungen rötlich, grünlich oder blaugrau verfärbt.

Die Herstellung erfolgt nach dem *Acheson-Verfahren* aus Quarz und Koks im Elektroofen bei einer Temperatur von ≈ 1700°C:

$$SiO_2 + 3\ C \rightarrow SiC + 2\ CO.$$

Siliziumkarbid wird als Schleifmittel, zur Herstellung feuerfester Steine, elektrischer Widerstände und Heizkörper (*Silitstäbe*) verwendet.

4.9. Petrolchemie

Zu den Aufgaben der Petrolchemie gehört die Herstellung organischer Verbindungen aus Erdöl (= Petroleum) und Erdgas. Erdöl und Erdgas sind Gemische aus flüssigen bzw. gasförmigen Kohlenwasserstoffen verschiedener Art. Aus ihnen sollen bestimmte Verbindungen isoliert oder durch chemische Umwandlung erzeugt werden. Der Vorteil des Erdöleinsatzes gegenüber Kohle besteht dabei vor allem in dem günstigeren Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis und den einfacheren und damit wirtschaftlicheren physikalischen und chemischen Verfahren.

Die petrolchemischen Produkte sind in folgende Hauptgruppen einzuordnen:

1. kurzkettige gesättigte Kohlenwasserstoffe, $n_C < 5$, Alkane,
2. längerkettige gesättigte Kohlenwasserstoffe, $n_C > 5$, Paraffine,
3. ungesättigte kettenförmige Kohlenwasserstoffe, Alkene (Olefine) und Alkadiene,
4. zyklische Kohlenwasserstoffe, wie Zyklopentan und Zyklohexan,
5. aromatische Kohlenwasserstoffe, wie Benzol, Toluol, Xylol.

Petrolchemische Erzeugnisse aus Alkanen. Das *Methan* wird zu verschiedenen Produkten verarbeitet. Wichtig ist die Umsetzung mit Wasser. Ein Synthesegas aus CO und H_2 ist für die Fischer-Tropsch-Synthese geeignet, durch die man je nach Reaktionsbedingungen Paraffinkohlenwasserstoffe von C_1 bis C_{70} gewinnen kann. *Äthan* und *Propan* werden vor allem durch Dehydrierung in die entsprechenden Alkene, Butan in Butadien überführt. Sie sind Ausgangsstoffe für die Plast- und Elastherstellung.

Kurzkettige Alkane können durch Chlorieren zu Lösungsmitteln, wie Chloroform und Tetrachlormethan, umgesetzt werden. Substitution anderer Halogene führt zu Kältemitteln (Freone, z. B. CF_2Cl_2). Längerkettige Paraffine lassen sich durch Oxydation, Sulfonierung oder Sulfochlorierung in waschaktive Produkte umwandeln. Die dazu günstigeren *n*-Paraffine – unverzweigte kettenförmige Kohlenwasserstoffe – lassen sich von den verzweigtkettigen Alkanen, den *i*-Paraffinen, nach dem *Parex-Verfahren* mittels sog. Molekularsiebe aus den Synthesegemischen abtrennen. Durch den *Krackprozeß* können höhere Kohlenwasserstoffe in niedermolekulare Alkane für die Benzinherstellung gespalten werden.

Petrolchemische Erzeugnisse aus ungesättigten Kohlenwasserstoffen. Aus Äthen, Buten und Butadien lassen sich durch Polymerisation Plaste und Elaste, wie Polyäthen und Synthesekautschuk (vgl. 4.10.4.), gewinnen. Die Addition von Wasser ergibt Alkohole, die vorwiegend als Lösungsmittel eingesetzt werden. Durch Anlagerungsreaktionen lassen sich eine Vielzahl verschiedener Produkte herstellen, z. B. können höhere Olefine durch Anlagerung von Schwefelsäure über Schwefelsäureester zu Waschmitteln verarbeitet werden.

Petrolchemische Erzeugnisse aus Aromaten. Von den aromatischen Kohlenwasserstoffen sind Benzol, Toluol, Xylol und Äthylbenzol von besonderer Bedeutung. Die Aromaten werden bei der Destillation des Erdöls oder nach dem *Reforming-Verfahren* – das ist ein kurzfristiges Krackverfahren von geradkettigen Kohlenwasserstoffen in Gegenwart von Katalysatoren – gewonnen.

Aromatische Kohlenwasserstoffe und ihre Abkömmlinge finden vielseitige Verwendung:

– Chlorierungsprodukte des Benzols und seiner Homologen z. B. als Insektizide und Pflanzenschutzmittel,

– Phenol zur Herstellung der Phenoplaste,

– Terephthalsäure als Ausgangsstoff für Polyesterfaserstoffe,

– Nitrotoluol zur Sprengstoffherstellung,

– Phthalsäurenanhydrid zu Farbstoffsynthesen.

4.10. Kunststoffe

Für die Chemie der Kunststoffe begann nach 1910 eine stürmische Entwicklung, die auch heute noch nicht abgeschlossen ist. Kunststoffe werden synthetisch hergestellt (Abb. 4.10.0-1) oder durch chemische Umwandlung natürlicher Makromoleküle gewonnen. Im engeren Sinne bezeichnet man organische Makromoleküle als Kunststoffe. Aber auch rein anorganische Verbindungen, wie die verschiedenen Gläser, Porzellane, Steingut, Keramik u. a., zählen zu den Kunststoffen.

Die organischen Kunststoffe können grob in Plaste und Elaste eingeteilt werden. Da eine exakte Definition und Klassifizierung der Kunststoffe noch aussteht, kann man sie einteilen nach den eingesetzten Ausgangsprodukten, der Art der Verbindungsbildung, dem chemischen Aufbau sowie dem chemischen und physikalischen Verhalten. Auch nach der Art des Einsatzes als Werkstoff ergeben sich Ordnungsmöglichkeiten.

Massenplaste sind vielseitig einsetzbar und stellen die Hauptmenge der hochmolekularen

Polyäthylen
Kettenbildung

$—CH_2—(CH_2—CH_2)_x—CH_2$

HO, CH_2, CH_2, OH, CH_2, OH

Phenoplaste
Bildung 3-dimensionaler Moleküle

S, S, CH_3, H_2, C, H, CH_3, CH_3

Kautschukvulkanisation
Vernetzung von Kettenmolekülen durch Schwefel (S)-Brücken

Abb. 4.10.0-1 Hauptprinzipien der Makromolekülbildung

Werkstoffe (Polyvinylchlorid, Polyäthylen, Polystyrol). *Konstruktionswerkstoffe* werden aufgrund ihrer relativ guten mechanischen Eigenschaften vielfach als Austauschwerkstoffe für Metalle u. a. anorganische Werkstoffe eingesetzt (Polyamide, Fluorpolymere, Polyurethane, Polykarbonate, Polyepoxide und Polyesterharze). *Spezialwerkstoffe* haben dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßte Eigenschaften (Polyimide, Polysulfone, Polyphenylenoxid u. a.).

4.10.1. Bildungsverfahren der Kunststoffe

Polymerisation. Hierunter versteht man die Vereinigung vieler kleiner organischer Moleküle (*Monomere*) zu sehr großen Molekülen (*Makromoleküle*), wobei Wärme frei wird. Bei gleichen Ausgangsstoffen sind die gebildeten Makromoleküle durch gleiche prozentuale Zusammensetzung und gleichen inneren Aufbau gekennzeichnet.

Voraussetzung eines polymerisationsfähigen Monomeren ist mindestens eine Doppelbindung zwischen 2 C-Atomen. Diese wird aufgespalten, und es entstehen freie Valenzen für die Bildung von Makromolekülen. Wenig beständige Ringverbindungen sind nach Aufspaltung ebenfalls polymerisationsfähig. Die Makromoleküle können als gerichtete, geradlinige, verzweigte, vernetzte oder verknäulte Moleküle vorliegen.

Der Polymerisationsvorgang wird in die 3 Phasen Start-, Kettenwachstums und Abbruchreaktion unterteilt.

Bei der *Startreaktion* werden die Doppelbindungen der Monomere durch Energiezufuhr aufgespalten. Die Energie kann in Form von Wärme, Licht, Druck, Ultraschall oder Kernstrahlung zugeführt werden. Auch chemische Polymerisationsanreger können eine Polymerisation initiieren.

Polymerisationsverfahren. Bei der *Blockpolymerisation* (Massenpolymerisation) entstehen feste Polymere aus flüssigen Monomeren ohne Lösungsmittel. Wegen der erschwerten Wärmeführung wird dieses Verfahren selten angewendet.

Lösungspolymerisation. Das Monomere wird in Lösungsmittel gelöst und polymerisiert. Vom Polymerisat werden noch vorhandene Monomeren durch ein weiteres Lösungsmittel abgetrennt. Im Gegensatz zur Blockpolymerisation ist eine gute Wärmeführung möglich. Es sind aber nur geringe Polymerisationsgrade erreichbar, die von Art und Menge des Lösungsmittels abhängen.

Emulsionspolymerisation. Durch Emulgatoren, vorwiegend Fettalkoholsulfonate, werden die Monomere in Wasser emulgiert und anschließend erhitzt. Das dabei entstehende Polymerisat ist unlöslich und fällt aus.

Suspensions- oder *Perlpolymerisation:* Die unlöslichen Monomere werden in einer Flüssigkeit fein verteilt (suspendiert). Durch Zusatz eines Katalysators polymerisieren die Monomeren. Das gebildete Polymerisat fällt in Form von Perlen aus, da der Katalysator nur innerhalb der fein verteilten Monomere wirken kann.

Misch- oder Kopolymerisation ist die Polymerisation eines Gemischs verschiedener Monomere. Sie wird zur Erreichung bestimmter Eigenschaften des Polymerisats angewendet, da man das Endprodukt bei diesem Verfahren weitgehend „einstellen" kann. Es können auch solche Monomere als Mischkomponente eingesetzt werden, die allein nicht polymerisierbar sind.

Der *Polymerisationsgrad* gibt an, wie viele Monomere (Grundmoleküle) sich zu einem Makromolekül vereinigt haben. Da aber die Länge der Molekülketten differiert, stellt er nur einen Mittelwert dar. Experimentell wird die durchschnittliche Molmasse bestimmt und durch die Molmasse des Monomers dividiert. Der Polymerisationsgrad kann auf physikalischem und chemischem Wege während einer Polymerisation beeinflußt werden.

Beispiele für Polymerisationsprodukte sind Polyvinylchlorid (PVC) und Polyakrylnitril, das vor allem für die Faserherstellung eingesetzt wird.

$$n\ \begin{matrix} H & & H \\ | & & | \\ C & = & C \\ | & & | \\ H & & Cl \end{matrix} \longrightarrow \left[\begin{matrix} & H & & H & \\ & | & & | & \\ - & C & - & C & - \\ & | & & | & \\ & H & & Cl & \end{matrix} \right]_n$$

Polymerisation von Vinylchlorid

Polyaddition. Bei diesem Reaktionstyp tritt keine Kohlenstoffkettenverlängerung auf. Die Makromoleküle bilden sich aus verschiedenartigen niedermolekularen Verbindungen, die meist mehrere reaktionsfähige Atomgruppierungen, wie $-OH$; $-NH_2$; $-COOH$ oder $-CH_2OH$, enthalten. Die Makromoleküle sind über eine C-Fremdatom-C-Brücke miteinander verbunden, und das Polyaddukt hat die gleiche Zusammensetzung wie das Ausgangsmaterial. Bei jedem Reaktionsschritt wird ein Wasserstoffatom umgelagert. Der stufenweise Aufbau der Polyaddukte läßt sich zwischenzeitlich nicht unterbrechen. Aus Polyaddukten werden Plaste, Elaste und Chemiefasern hergestellt. Polyurethane sind Thermoplaste, die durch Polyaddition von Diisozyanaten $OCN-(CH_2)_n-NCO$ und zweiwertigen Alkoholen $HO-(CH_2)_n-OH$ o. a. hydroxylgruppenhaltigen Verbindungen entstehen. Als Monomere dienen sowohl aliphatische als auch aromatische Diisozyanate.

Polykondensation. Polykondensate entstehen durch Vereinigung von Monomeren, die mindestens 2 reaktionsfähige polare, aber unterschiedliche Atomgruppen haben. Solche niedermolekularen Ausgangsprodukte können Substanzen

sein, die –OH-, NH- oder –COOH-Gruppen aufweisen. Die Polykondensation ist mit einer Abspaltung einfacher Moleküle, wie Wasser, Alkohol, Wasserstoff u. a., verbunden. Das Polykondensat hat deshalb nicht die gleiche Zusammensetzung wie die Ausgangsstoffe.
Die Polykondensation dient zur Herstellung von Polyestern, Phenolharzen, Amino- und Thioplasten.
Teil- und vollsynthetische Kunststoffe. *Vollsynthetische Kunststoffe* bestehen aus künstlich hergestellten Makromolekülen. *Teilsynthetische Kunststoffe* kommen dagegen natürlich vor und werden lediglich durch Veränderungen oder Ergänzungen dem Verwendungszweck angepaßt. Zu dieser Gruppe zählen Naturkautschuk, Zellulose, Kasein, Pflanzenöle, Naturharze u. a. Kautschuk wird z. B. durch Vulkanisation mit feinverteiltem Schwefel und Zusatz von Hilfsstoffen umgebildet. Durch den Schwefel werden die Makromolekülketten über Schwefelbrücken miteinander verknüpft (Vernetzung), wobei mit steigender Vernetzung die Elastizität des Kautschuks abnimmt (vgl. 5.2.2.).

4.10.2. Plaste

Plaste sind hochpolymere und überwiegend amorphe Stoffe, die nur selten einen kristallinen Aufbau haben. Es sind Gemische mehrerer ähnlicher, nicht voneinander trennbarer Molekülarten, die jedoch in einer bestimmten Substanz stets das gleiche Bauprinzip aufweisen. Je nach Verbindungsweise der Monomeren im Makromolekül (vgl. 4.10.1.) sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften bestimmt.
Obwohl die Herstellung polymerer Werkstoffe erst ab 1945 ein bemerkenswertes Produktionsvolumen erreichte, verdoppelte sich die Produktion hochpolymerer Werkstoffe seit 1950 alle 5 Jahre. Der Anteil der eingesetzten Polymerwerkstoffe im Gesamtwerkstoffaufkommen beträgt im Weltmaßstab 1 bis 2 %. Plaste werden nur dort eingesetzt, wo sie eine Ergänzung der übrigen Werkstoffe darstellen und aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften, wie einfache Verarbeitung, geringe Dichte und hohe Korrosionsbeständigkeit, besonders gut geeignet sind.
Plaste durch Umwandlung von Naturstoffen. ***Plaste auf Zellulosegrundlage.*** Rohstoffe für die Zelluloseherstellung sind Holz, Stroh und Schilf, aus denen durch einen Aufschluß störende Bestandteile, vor allem Lignin, entfernt werden müssen (vgl. 7.4.2.).
Zellulose ist ein wichtiger Rohstoff für die Papier- und Textilindustrie und Ausgangsprodukt für die chemische Weiterverarbeitung zu Kunststoffen, Kunstseiden, Chemiefasern, Lacken u. a.

Zellulosenitrat (Nitrozellulose) ist eine polymere Substanz, die hauptsächlich aus Zellulosetrinitrat besteht $[C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_n$.
Sie wird durch Veresterung von Zellstoff mit Nitriersäure (1 Teil konzentrierte Salpetersäure, 2 bis 3 Teile konzentrierte Schwefelsäure und 5 bis 20 % Wasser) hergestellt.

$$[C_6H_7O_2(OH)_3]_n + 3HNO_3 \rightarrow [C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_n + 3H_2O$$

Es ist eine weiße faserige Masse, die beim Entzünden ohne Rauchentwicklung verbrennt. In Abhängigkeit vom Veresterungsgrad unterscheidet man zwischen Kollodium- und Schießbaumwolle (vgl. 4.13.2.).
Zellulosenitrat ist der älteste Kunststoff von Bedeutung und die Basis von Zelluloid, Lacken, plastischen Stoffen, Explosiv- und Raketentreibstoffen. *Zelluloid* entsteht durch Umsetzung von Zellulosenitrat mit Kampfer. Die elastische, hornartige, thermoplastische Masse ist auch heute noch ein wertvoller Kunststoff, der zu Brillengestellen, Folien, Behältern, Klaviertasten, Filmmaterial u. a. verarbeitet wird.
Zelluloseazetat entsteht durch Einwirkung eines Gemischs aus Eisessig und Essigsäureanhydrid auf Zellulose. Das gebildete Zellulosetriazetat löst sich nur in Chloroform und läßt sich nur schwer verarbeiten. Durch Teilhydrolyse wird der Anteil der Azetylgruppen auf 2 bis $2^1/_2$ je Glukoseeinheit reduziert und die in Azeton, Dioxan und Essigsäuremethylester lösliche Azetylzellulose durch Extrusion oder im Spritzgußverfahren (vgl. 5.1.2.) zu thermoplastischen Massen oder Azetatseiden, Folien, Filmen oder Lacken, die schwer brennbar sind, weiterverarbeitet.
Viskoseseide vgl. 4.10.5.
Vulkanfiber. Die Vulkanfiber ist einer der ersten Kunststoffe und basiert auf Zellulose. Papier- oder Nesselbahnen – möglichst weich und saugfähig – werden durch ein warmes Zinkchloridbad (70%ig) geführt und auf einer Walze unter Gegendruck aufgewickelt. Nach Aufteilung in Platten folgen Wasch-, Trocken- und Preßvorgänge. Eine Nachbehandlung der Platten mit Glyzerin, Kalziumchlorid oder Magnesiumchlorid führt zur flexiblen Vulkanfiber.
Synthetische Plaste. Diese große Werkstoffgruppe beruht auf der Basis von Kohle oder Erdöl bzw. Erdgas. Den daraus gewonnenen Ausgangsprodukten werden stickstoff- und halogenhaltige Verbindungen beigegeben, um die verschiedenen Plastwerkstoffe und gewünschten Eigenschaften zu erzielen.
Duroplaste. *Phenoplaste* sind der Oberbegriff für Polykondensate auf der Basis von Phenol-Formaldehyd-Verbindungen. Bei Massenverhältnissen zwischen Phenol und Formaldehyd von 1:2 bis 1:3 entstehen im sauren Medium Phenolharze vom Novolaktyp. Bei Vernetzung nur durch Zusatz von Härtungsmitteln bilden sich im alka-

lischen Medium Phenolharze vom Resoltyp, die selbsthärtend sind. Phenoplaste sind schlechte Wärme- und elektrische Leiter, können die Härte von Kupfer erreichen und verkohlen beim Erhitzen über 300°C ohne zu schmelzen. Aus diesen Eigenschaften leiten sich vielseitige Anwendungsmöglichkeiten ab.

Polyakrylnitril. Das Monomer Akrylnitril oder Akrylsäurenitril gewinnt man durch die Reaktion zwischen Propylen und Ammoniak in Gegenwart von Sauerstoff:

$$H_2C{=}CH{-}CH_3 + NH_3 + {}^3/_2\, O_2 \rightarrow$$
$$H_2C{=}CH{-}CN + 3H_2O.$$

Polyakrylnitril ist Ausgangsmaterial für synthetische Fasern. Durch Mischpolymerisation mit Butadien entsteht der ölfeste synthetische Kautschuk Perbunan. Da Polyakrylnitril nicht aus der Schmelze verarbeitet werden kann, war es wesentlich, daß man mit Dimethylformamid ein geeignetes Lösungsmittel fand.

Bekannte Herstellerbezeichnungen für Fasern auf Polyakrylnitrilbasis sind u. a. Orlon, Wolcrylon, Prelana, Dralon.

Aminoplaste sind Formaldehydkondensationsprodukte mit Aminoverbindungen, wie Harnstoff, Dicyandiamid u. a., sowie entsprechenden Derivaten. Preßmassen aus Aminoplasten sind gegen viele organische und anorganische Verbindungen beständig. Aminoplaste werden zu Gegenständen des täglichen Bedarfs, zu Elektroartikeln sowie Anstrich- und Beschichtungsmitteln verarbeitet.

Epoxidharze. Die Grundharze werden aus Epoxiden oder Derivaten, wie Epichlorhydrin, durch Umsetzung mit aromatischen Diolen, wie Diphenol-A, oder Dian, hergestellt.

glykol, 1,3 Butylenglykol, 1,2 Propylenglykol) und gesättigten und ungesättigten Dikarbonsäuren (z. B. Bernsteinsäure, Phthalsäure, Fumarsäure, Itakonsäure) oder deren Anhydride.

Bei der Kondensationsreaktion ergeben sich je nach Bedingungen und Ausgangsmaterial viskose bis harte ungesättigte Polyester. Zu diesen Verbindungen zählen auch Mischungen mit zur Vernetzung geeigneten Monomeren, wie Styrol, Phthalsäureallylester, Methylmethakrylat u. a. Die Vernetzung erfolgt durch Erwärmen oder Peroxidkatalysatoren und führt zur Härtung. Ungesättigte Polyester werden u. a. als Gießharze, für Anstrichmittel, glasfaserverstärkte Kunststoffe und Baumaterial (Polyesterbeton) verwendet.

Kurzzeichen von Duroplasten vgl. Tab. 5.1.1-3.

Thermoplaste. *Polyvinylchlorid* (PVC) wird durch Polymerisation aus dem monomeren Vinylchlorid hergestellt, das durch Anlagerung von Chlorwasserstoff an Äthin in Gegenwart von Katalysatoren entsteht:

$$HC{\equiv}CH + HCl \rightarrow H_2C{=}CHCl.$$

Vinylchlorid ist ein farbloses Gas, das sich nur wenig in Wasser löst. Deshalb wird es durch Suspensions- oder Emulsionspolymerisation in Polyvinylchlorid überführt.

$$n\ H_2C{=}CHCl \rightarrow \left[\begin{array}{c} CH_2{-}\underset{\displaystyle Cl}{\underset{|}{CH}} \end{array}\right]_n$$

$$2\,\underset{\displaystyle \diagdown O \diagup}{H_2C{-}CH}{-}CH_2Cl + HO{-}C_6H_4{-}\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{C}}{-}C_6H_4{-}OH \rightarrow$$

$$\underset{\displaystyle \diagdown O \diagup}{H_2C{-}CH}{-}CH_2{-}O{-}C_6H_4{-}\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{C}}{-}C_6H_4{-}O{-}CH_2{-}\underset{\displaystyle \diagdown O \diagup}{CH{-}CH_2} + 2HCl$$

Reaktionsverlauf zwischen Epichlorhydrin und Dian

Bei geeigneter Reaktionsführung kann man nieder- oder höhermolekulare Epoxidharze gewinnen. Durch weitere Reaktionen der Epoxidgruppen mit Aminen (basischer Härter) oder mehrbasischen Säuren werden sie gehärtet. Die erforderliche Härtermenge richtet sich nach der Zahl der im Harz enthaltenen Epoxidgruppen. Die Epoxidharze haben eine hohe Härte, Schlagzähigkeit und Abriebfestigkeit. Sie sind beständig gegen Wasser, Säuren, Basen und viele organische Lösungsmittel.

Ungesättigte Polyester gewinnt man durch Polykondensation aus aliphatischen Diolen (Äthylen-

PVC-hart (ohne Weichmacher) ist gegen Wasser, Säuren, Laugen, Alkohol und Öl beständig, gegen Benzin, Benzol u. a. organische Lösungsmittel jedoch unbeständig. *PVC-weich* ist elastisch und gummiähnlich und hat gegen Chemikalien nur eine geringe Resistenz.

Polyvinylacetat wird durch Polymerisation des Vinylacetats hergestellt. Das Polymerisat ist leicht und wärmebeständig, aber wenig beständig gegen Wasser, niedere Alkohole, Ester, Ketone, aromatische und Chlorkohlenwasserstoffe.

Polyvinylalkohol. Die Darstellung durch Polymerisation des Vinylalkohols ist direkt nicht

möglich, sondern nur über den Umweg der Verseifung von Polyvinylacetat. Er ist beständig und unlöslich in den meisten organischen Lösungsmitteln, Fetten und Ölen, dagegen leicht löslich in Wasser unter Bildung einer viskosen Lösung.

Polyäthylen entsteht durch Polymerisation von Äthylen (Tafel 19). Man unterscheidet Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckpolyäthylen. Je nach Art des Polymerisationsverfahrens kann Polyäthylen als festes Produkt, Schmieröl oder wachsartige Substanz gewonnen werden.

Polyäthylen-fest besitzt gute mechanische und dielektrische Eigenschaften. Es ist beständig gegen Säuren, Basen und bei Raumtemperatur gegen fast alle Lösungsmittel.

Polypropylen wird durch Polymerisation von Propylen dargestellt. Es zeichnet sich durch Härte, Steifheit, Wärme- und Chemikalienbeständigkeit aus und wird häufig als Mischpolymerisat mit Äthylen eingesetzt.

Polytetrafluoräthylen (PTFE) ist ein Polymerisat aus dem Monomer Tetrafluoräthylen und hat eine hohe Resistenz gegen Wärme und Chemikalien. Es ist empfindlich gegen Fluor, Chlortrifluorid und Alkalimetalle. PTFE ist wegen seines hohen Erweichungspunktes nicht plastisch verformbar und wird daher mechanisch bearbeitet. Zusätze von Füllstoffen, wie Glaspulver, Asbest, Graphit u. a., erhöhen seine Festigkeitseigenschaften. Einsatzgebiete sind vor allem die Elektro- und Chemieindustrie.

Polystyrol. Die Herstellung erfolgt durch Polymerisation des Styrols, das aus Äthylbenzol gewonnen wird. Der Thermoplast ist beständig gegen Säuren und Laugen, aber wenig beständig gegen viele andere Chemikalien. Polystyrol wird als Komponente von Mischpolymerisaten eingesetzt, wodurch seine Eigenschaften gezielt verändert werden können. Mit Kautschuk oder Butadien polymerisiert, ergibt es schlagfestes Polystyrol, mit Acrylnitril und Butadien schlagzähes Polystyrol.

Polyacrylat (Polyacrylsäureester) ist ein Polymerisationsprodukt des Acrylsäureesters, der durch Umsetzung von Äthin mit Kohlenmonoxid in Gegenwart eines Katalysators und anschließender Destillation mit Alkohol gewonnen wird. Polyacrylate können je nach Polymerisationsgrad zähflüssige Lösungen oder feste Produkte ergeben. Zugesetzte Füllstoffe verändern die Viskosität. Mit Styrol, Vinylchlorid oder Acrylnitril werden Mischpolymerisate hergestellt.

Polyamid ist ein Polykondensationsprodukt, das periodisch auftretende sog. Peptidbindungen –CO–NH– aufweist. Die Reaktion kann von höheren Aminokarbonsäuren oder ihren Laktamen, z. B. ε-Aminokapronsäure, ausgehen. Ferner sind Dikarbonsäuren und Diamine geeignet, wie z. B. die Polykondensation von Adipinsäure $HOOC-(CH_2)_4-COOH$ und Hexamethylendiamin $H_2N-(CH_2)_6-NH_2$.

Polyamide erhält man auch durch Mischung verschiedener Dikarbonsäuren und Diamine, so daß die Variationsmöglichkeiten sehr groß sind.

Polyamide sind farblose Substanzen, undurchsichtig bis glasklar, mit hoher Zug-, Biege-, Schlag- und Abriebfestigkeit. Sie sind beständig gegen Alkalien und organische Lösungsmittel. Von Säuren werden sie leicht angegriffen.

Polyurethan wird durch Polyaddition von Diisozyanaten OCN–R–NCO ($R = CH_2$-Gruppen) mit Verbindungen, die Hydroxylgruppen enthalten, dargestellt. Auch Amine, Amide, Urethane und Merkaptane können an Stelle von Alkoholen eingesetzt werden. Besonders geeignete Ausgangsprodukte sind Hexamethylendiisozyanat $OCN-(CH_2)_6-NCO$ oder ein Isomerengemisch von 2,4- und 2,6-Toluoldiisozyanat.

NCO, CH₃, —NCO, CH₃, NCO, NCO

Als Verbindungen mit Hydroxylgruppen verwendet man Äthylenglykol, Propandiol-1,3, Butandiol-1,4, Hexantriol u. a. Die Verknüpfung der Monomere erfolgt ähnlich wie bei den Polyamiden über Peptidbindungen –CO–NH–.

Je nach der Anzahl der funktionellen Gruppen –NCO bzw. –OH entstehen lineare oder vernetzte Polymere. Durch Variation der Ausgangsprodukte und der Herstellungsbedingungen erhält man Faserstoffe, Festkörper, Schaumstoffe, Lacke und Metallkleber mit unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften.

Kurzzeichen von Thermoplasten vgl. Tab. 5.1.1-2; zur Technik der Plaste vgl. 5.1.

4.10.3. Silikone

Silikone sind siliziumorganische Verbindungen (Organopolysiloxane) mit einem Grundgerüst aus Silizium und Sauerstoff, wobei an jedes Siliziumatom mindestens eine organische Gruppe gebunden ist.

$$R-\underset{R}{\overset{R}{Si}}-O-\left[\underset{R}{\overset{R}{Si}}-O-\right]_n\underset{R}{\overset{R}{Si}}-R$$

Aufbauschema eines Silikonmoleküls

Durch Variation von Zahl und Art der organischen Gruppen kann man die Eigenschaften der Silikone beeinflussen.

Darstellung der Silikone. Durch Umsetzung von Siliziumtetrachlorid ($SiCl_4$) mit metallorganischen Verbindungen entstehen *Siliziumhalogenide*.

$SiCl_4 + 2\ CH_3{-}Mg{-}Cl \rightarrow$
$(CH_3)_2SiCl_2 + 2\ MgCl_2$

Diese werden hydrolisiert, und aus den gebildeten *Silanolen* erhält man durch Kondensation Silikone:

$(CH_3)_2SiCl_2 + 2\ H_2O \rightarrow (CH_3)_2Si(OH)_2 + 2\ HCl$

Bei einem anderen Verfahren wird durch direkte Umsetzung von Silizium mit Alkylhalogeniden in Gegenwart von Katalysatoren (Kupfer, Silber) bei Temperaturen zwischen 280 und 300°C *Alkylchlorsilan* hergestellt, das dann zu Silanol umgebildet wird.

$Si + 2\ CH_3Cl \rightarrow (CH_3)_2SiCl_2$

Silikone sind beständig gegenüber vielen Chemikalien, haben ein gutes elektrisches Isoliervermögen und sind wasserabstoßend.

Silikonöle bestehen aus kurzen Ketten oder ringförmigen Einheiten. Es sind klare Flüssigkeiten, die sich in vielen organischen Lösungsmitteln, wie Benzin, Benzol u. a., lösen. Sie sind chemisch inaktiv und im Temperaturbereich von −70 bis +250°C stabil. Zwischen −25 und + 100°C ist die Viskosität nahezu konstant. Silikonöle besitzen eine hohe Kompressibilität, gute Kältebeständigkeit und niedrige Oberflächenspannung.

Silikonharze sind dreidimensional vernetzt, so daß wärmehärtbare Polymere ohne thermoplastische Eigenschaften entstehen. Sie werden als Bindemittel zur Herstellung von glasfaserverstärkten Plasten und in der Lackindustrie verwendet.

Silikonlacke werden durch Lösen von Silikonharzen in organischen Lösungsmitteln, wie Toluol oder Xylol, gewonnen und vor allem als Isolierlacke in der Elektroindustrie eingesetzt.

4.10.4. Elaste

Elaste sind Stoffe mit kautschukartigen Eigenschaften, die eine Dehnung bis zu 800 % gestatten und beim Wegfall der Belastung wieder den Ausgangszustand annehmen. Zu den Elasten gehören alle Produkte aus natürlichem und synthetischem Kautschuk oder kautschukähnlichen Stoffen.

Synthetische Kautschuke. Die Hauptmenge der synthetischen Kautschuksorten hat Butadien $CH_2{=}CH{-}CH{=}CH_2$ als Ausgangsprodukt. Es wurden viele Verfahren entwickelt, nach denen Butadien aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen hergestellt wird.

Beim *Lebedew-Verfahren* wird Alkohol zu Acetaldehyd oxydiert, der in Gegenwart eines Siliziumdioxidkatalysators mit einem weiteren Molekül Alkohol zu Butadien reagiert.

$CH_3{-}CH_2OH + CH_3CHO \rightarrow$
$CH_2{=}CH{-}CH{=}CH_2 + 2\ H_2O.$

Beim thermischen Kracken von Erdölbestandteilen (Naphta oder Leichtöl) bei 700 bis 760°C werden bis zu 0,8 % des Ausgangsprodukts auch in Butadien überführt. Die Ausbeute an Butadien wird durch Dehydrierung von Butan und Buten erhöht.

Bei der *Butadiendarstellung aus Äthin* geht man von Koks bzw. Kalziumkarbid aus (vgl. 4.8.1.), aus dem Äthin hergestellt wird:

$3\ C + CaO \rightarrow CaC_2 + CO$
$CaC_2 + 2\ H_2O \rightarrow HC{\equiv}CH + Ca(OH)_2.$

Die Weiterverarbeitung des Äthin erfolgt über die Stufen Acetaldehyd, Aldol, Butandiol-1,3 zu Butadien.

Die meisten Butadien-Kautschuksorten sind Copolymere mit anderen Verbindungen (vgl. 5.2.2.).

Thioplaste sind Produkte mit kautschukartigen Eigenschaften, die durch Reaktion einer Polychlorverbindung mit Natriumpolysulfid hergestellt werden. Wegen ihrer hohen Beständigkeit gegen Öle sind sie technisch bedeutsam.

4.10.5. Chemiefaserstoffe

Das Produktionsvolumen der Chemiefaserindustrie im Weltmaßstab ist bisher ständig angestiegen. Der Anteil von Chemiefaserstoffen an der Gesamtproduktion von Textilfasern beträgt gegenwärtig schon über 40 %.

Ausgangsstoffe für die Chemiefaserherstellung sind natürliche Polymere, synthetische Polymere und anorganische Materialien (Tab. 4.10.5-1; vgl. 6.6.5. und 19.1.2.).

Kunstfasern auf Zellulosebasis. Die Herstellung von *Kunstseide* erfolgt durch Auflösen von Zellstoff bzw. Zelluloseestern und Wiederausfällen durch feine Spinndüsen in Fällbädern (*Naßspinn-*

Tab. 4.10.5-1 *Kurzzeichen der wichtigsten Chemiefaserstoffe*

AZ	*Azetatfaserstoffe*
GL	*Glasfaserstoffe*
GU	*Gummifaserstoffe*
MT	*Metallfaserstoffe*
PA	*Polyamidfaserstoffe*
PE	*Polyesterfaserstoffe*
PP	*Polypropylenfaserstoffe*
PT	*Polyäthylenfaserstoffe*
PU	*Polyurethanfaserstoffe*
PVA	*Polyvinylalkoholfaserstoffe*
PVC	*Polyvinylchloridfaserstoffe*
PVY	Polyakrylnitrilfaserstoffe (*Polyvinylzyanid*)
VI	*Viskosefaserstoffe*

verfahren) durch Verdampfen der Lösungsmittel (*Trockenspinnverfahren*).

Viskoseseide. Durch Umsetzung von Zellstoff mit verdünnter Natronlauge und Schwefelkohlenstoff bildet sich ein Zellulosexanthogenat.

$$\left[S{=}C\begin{matrix} \diagup O(C_6H_9O_4) \\ \diagdown SNa \end{matrix} \right]_n$$

Beim Auflösen in Natronlauge entsteht eine hochviskose kolloidale Lösung, die *Viskose*. Nach einer Reifezeit wird sie in ein Fällbad aus verdünnter Schwefelsäure gedrückt (Naßspinnverfahren). Die entstandene Zellulosexanthogensäure zerfällt dabei unter Rückbildung des Zellulosefadens. Danach wird das Garn gebleicht und getrocknet.

Kupferseide. Zellulose wird in einer ammoniakalischen Lösung von Kupferhydroxid (Schweizers Reagens) gelöst. Die gefilterte Lösung wird durch Spinndüsen in fließendes Wasser gepreßt, wodurch die dehnbaren Fäden gestreckt und anschließend durch verdünnte Schwefelsäure entkupfert werden. Durch diesen kombinierten Spinn- und Streckprozeß erhält man feinere Fäden, als sie die Naturseide aufweist.

Azetatseide. Durch Einwirkung von Essigsäureanhydrid und Schwefelsäure auf Zellulose entsteht ein Zellulosetriazetat, das nur in Chloroform löslich ist. Durch partielle Hydrolyse entsteht Zellulose mit durchschnittlich nur 2 bis $2^1/_2$ Azetylgruppen je Glukoseeinheit. Dieses Produkt ist in Azeton löslich und wird nach dem Trockenspinnverfahren zu Azetatseide verarbeitet.

Vollsynthetische Fasern. *Proteinfasern*. Durch Säuren koaguliertes Milcheiweiß, Kasein, wird in 20%iger Natronlauge gelöst und durch Spinndüsen in ein schwefelsaures Fällbad gedrückt. Die entstehenden Fäden werden mit Formaldehyd gehärtet. Die Proteinfasern haben das Aussehen und die äußere Beschaffenheit von Wolle und lassen sich durch viele Wollfarbstoffe anfärben.

Polyamidfasern haben die typische Peptidbindung der Eiweißstoffe. Daraus resultiert eine strukturelle Ähnlichkeit von Proteinen und Polyamiden. Polyamide können durch Polymerisation aus zyklischen Säureamiden, den Laktamen, gebildet werden, z. B. Dederon und Perlon.

Ausgangsprodukte für die Kaprolaktam-Synthese sind Phenol, Benzol, Zyklohexan und Toluol.

Die Umwandlung der zyklischen (ringförmigen) Kaprolaktammoleküle in ein gestrecktes Polymermolekül erfolgt nach dem VK-Verfahren (VK = vereinfacht – kontinuierlich). Das Kaprolaktam wird geschmolzen, mit Wasser (5 bis 10% der Gesamtmasse) und Stabilisatoren gemischt und unter Sauerstoffausschluß im VK-Rohr bei Temperaturen bis 260°C polymerisiert.

Die erste Polyamidfaser, die Nylonfaser, wurde durch Polykondensation aus Adipinsäure und Hexamethylendiamin gewonnen. Ausgangsprodukte zur Herstellung von Adipinsäure sind Furfurol (aus Haferspelzen, leeren Maiskolben oder Baumwollsamenschalen gewinnbar), Äthin und Formaldehyd oder Butadien sowie Zyklohexan oder Phenol.

Zur Herstellung von Nylon wird eine adipinsaure Lösung von Hexamethylendiamin mit Essigsäure als Stabilisator im Autoklaven (1,5 bis 1,7 MPa) zu Polyhexamethylenadipinamid („Nylon") kondensiert. Die Schmelze wird unter Schutzgas durch Spinndüsen gedrückt (*Schmelzspinnverfahren*, Tafel 18). Die Fäden erstarren im Luftstrom.

Polyesterfasern entstehen durch Veresterung von zweibasischen organischen Säuren mit zweiwertigen Alkoholen unter Abspaltung von Wasser und anschließender Polykondensation. Typischer Vertreter des faserbildenden Polyesters ist Polyäthylenglykolterephthalat. Reaktionsprodukte sind Äthylenglykol und Terephthalsäure, die technisch aus Xylol oder Toluol dargestellt wird. Die Fadenbildung erfolgt nach dem Schmelzspinnverfahren. Bekannte Polyesterfaserstoffe sind z. B. „Grisuten*" und „Trevira".

Polyäthylenfasern. Man unterscheidet zwischen Hochdruck- und Niederdruckpolyäthylen, deren Ausgangsprodukt Äthylen (Äthen) ist. Die Äthylenpolymerisation wird mit Titantrichlorid- und Aluminiumtriäthylkatalysatoren drucklos ausgeführt. Hochdruckpolyäthylen wird bei 200°C und 200 MPa gewonnen.

Polypropylenfasern. Das Propylen kann unter Normalbedingungen oder unter Druck bis zu 1 MPa in flüssiger oder gasförmiger Phase katalytisch polymerisiert werden. Das Festpolymerisat wird gewaschen, getrocknet und zu Schnitzeln verarbeitet. Die Schnitzel werden wieder geschmolzen und im Schmelzspinnverfahren zu Fasern versponnen.

Polyakrylnitrilfasern. Die Grundsubstanz ist Akrylnitril, das durch direkte Anlagerung von Zyanwasserstoff an Äthin hergestellt werden kann.

Ein anderes Verfahren geht von Propylen und Ammoniak aus, die zu Akrylnitril oxydiert werden.

Die Kettenbildung zu Polyakrylnitril erfolgt nach dem Emulsions-, Suspensions- oder Lösungspolymerisationsverfahren.

Aus Lösungen von Polyakrylnitril in Dimethylformamid werden dann im Trockenspinnverfahren Mehrfachfäden hergestellt. Bekannte Produkte sind z. B. „Wolpryla", „Dralon" und „Orlon".

Vinylfasern. Ausgangsmaterial für Vinylfasern ist Vinylchlorid (vgl. 4.10.2.).

Die Polymerisation zu PVC erfolgt unter Druck mit Hilfe peroxidhaltiger Katalysatoren. Nachchloriertes PVC wird zur Faserherstellung (PeCe-Faser) in wasserfreiem Azeton gelöst und im Trocken- und Naßspinnverfahren weiterverarbeitet.

Polyvinylalkoholfasern. Das Ausgangsprodukt zur Herstellung von Polyvinylalkohol ist Polyvinylazetat, das sich durch Methylalkohol zu Polyvinylalkohol spalten läßt. Polyvinylalkohol ist weiß und feinkörnig. Zur Faserproduktion wird er ausschließlich im Naßspinnverfahren verarbeitet.

Polyurethanfasern. Ausgangsprodukte sind Diisozyanate, die durch Polyaddition mit Diolen lineare Kettenmoleküle mit der Urethangruppierung –R–NH–CO–OR– bilden. Die Polyaddition kann sowohl direkt oder in Lösung erfolgen. Das auf direktem Wege erzeugte Polyurethan wird unmittelbar aus der Schmelze versponnen, während das aus der Lösung abfiltrierte Produkt getrocknet und durch Düsen extrudiert wird.

4.11. Technische Fette — Öle — Wachse

4.11.1. Fette

Die natürlichen Fette sind tierischer oder pflanzlicher Herkunft. Es sind Glyzerinester höherer Karbonsäuren, die auch als *Fettsäuren* bezeichnet werden. Das Glyzerin ist in den Fetten mit verschiedenen Fettsäuren verestert. Die Unterschiede zwischen den Fetten sind durch die in ihnen veresterten Fettsäuren bedingt.

Besonders häufig vorkommende Fettsäuren sind die *Laurinsäure* $C_{11}H_{23}COOH$, *Palmitinsäure* $C_{15}H_{31}COOH$, *Stearinsäure* $C_{17}H_{35}COOH$ und die *Linolsäure* $C_{17}H_{31}COOH$.

Feste Fette sind überwiegend Glyzerinester der gesättigten Fettsäuren, wie Laurin-, Stearin- und Palmitinsäure. In *Ölen* (flüssige Fette) liegen Glyzerinester vorwiegend ungesättigter Fettsäuren, wie Öl-, Linol- und Linolensäure, vor.

Fetthärtung. Harte oder feste Fette sind für die menschliche Ernährung und auch für technische Zwecke oftmals besser geeignet als Öle. Vor allem billige Öle pflanzlicher und tierischer Herkunft werden deshalb durch zusätzliche Anlagerung von Wasserstoff (Hydrierung) gehärtet. Dadurch werden die ungesättigten Glyzerinester in gesättigte Ester mit höheren Schmelzpunkten überführt, die chemisch den natürlich vorkommenden festen Fetten entsprechen.

Durch die Hydrierung werden die Ausgangsprodukte auch geruch- und geschmacklos. Gehärtete Fette aus Palm-, Kokos-, Erdnuß-, Sojabohnen-, Rapsöl und Waltran werden für die Margarineherstellung oder technische Zwecke aufbereitet. Für die menschliche Ernährung wichtige ungesättigte Säuren, wie z. B. Linolsäure, werden neben Eigelb, Karotin und Vitaminen der Margarine zugesetzt.

Fettspaltung ist eine Hydrolyse der Fettsäureglyzerinester zur technischen Gewinnung von Glyzerin und Fettsäuren aus natürlichen Fetten. Zur Glyzerin- und Seifengewinnung ist das Kochen von Fetten mit Natron- oder Kalilauge das hauptsächlich angewandte Verfahren.

Synthetische Fettsäuren sind Monokarbonsäuren mit der funktionellen Karboxylgruppe $-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-OH$. Die Herstellung synthetischer Fettsäuren erfolgt durch die Oxydation von primären Alkoholen oder Aldehyden. Besonders Paraffine aus der Erdöl- und Kohleveredlung werden in Gegenwart von Kaliumpermanganat mit Luftsauerstoff bei über 100 °C umgesetzt. Die Oxydation der Paraffine ist dabei stets mit einer Kettenspaltung verbunden und führt zu Fettsäuren, die als Rohstoffe für die Seifen-, Waschmittel-, Anstrichmittel- und Plastherstellung dienen.

4.11.2. Seifen

Die Natrium- und Kaliumsalze von gesättigten und ungesättigten Fettsäuren mit 10 bis 18 Kohlenstoffatomen nennt man *Seifen.* Sie dienen meist als Netz-, Emulgier- und Waschmittel. Die überwiegende Menge harter Seifen werden nach dem Siedeverfahren hergestellt, das die 3 Grundvorgänge Verseifen, Auswaschen und Klarsieden umfaßt.

Das Fett wird mit der Alkalilauge gekocht und die Seife mit Natriumchlorid (Kochsalz) ausgefällt. Nach dem Trennen von Seife und Salzlösung wird die Seife „nachverseift". Anschließend erfolgt das Klarsieden mit Wasser, um ein glattes Produkt zu erhalten.

$$\begin{array}{l} H_2C-OOC-C_{15}H_{31} \\ \quad | \\ \;HC-OOC-C_{17}H_{35} + 3\,NaOH \rightarrow \\ \quad | \\ H_2C-OOC-C_{17}H_{33} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} H_2COH & C_{15}H_{31}COONa \\ \quad | & \\ H\,COH + & C_{17}H_{35}COONa \\ \quad | & \\ H_2COH & C_{17}H_{33}COONa \end{array}$$

Verseifung von Fett mit Natronlauge zu Glyzerin (links) und Natriumsalze höherer Fettsäuren (rechts)

Moderne Verfahren verseifen mit überhitztem Wasserdampf bei 180 °C in kontinuierlicher Arbeitsweise bei vollständiger Gewinnung des Glyzerins. Durch Mischen der Fette lassen sich vielfältige Seifensorten herstellen.

Kernseifen werden aus 2 Teilen Fett und einem Teil Kolophonium hergestellt. Den weißen Kernseifen werden oft bis 12% Natriumsilikat, 5% Natriumkarbonat und bis 5% Trinatriumphosphat als Füllstoffe zugesetzt. Nach dem Trocknen kann die Seife zu Seifenschnitzeln und -flocken zerkleinert oder durch ein Sprühverfahren zu Seifenpulver verarbeitet werden.
Feinseifen werden aus den Rohstoffen Talg, Palmöl oder Kokosfett gewonnen. Die Grundseife wird getrocknet, geschnitzelt, gewalkt und geknetet (piliert) sowie mit Farb- und Duftstoffen versetzt. Als Duftstoffe werden an Grundmaterialien vor allem Rosmarin-, Nelken-, Lavendel-, Zedernholz-, Fichtennadel- oder Sandelholzöl bzw. entsprechende Duftkombinationen zugesetzt. Andere Zusätze führen zu Spezialseifen.

4.11.3. Waschmittel

Waschmittelwirkung. Der Grundvorgang beim Waschen ist die Herabsetzung der Grenzflächenspannung. Reinigungsgut und Schmutz werden benetzt, Schmutzpigmente dispergiert und fettige Verunreinigungen emulgiert.
Waschmittel sind grenzflächenaktive Stoffe. Darunter versteht man Verbindungen, die sich in einem Lösungsmittel so verteilen, daß ihre Konzentration an den Grenzflächen größer ist als im Inneren des Lösungsmittels. Dadurch wird die Grenzflächenspannung des Lösungsmittels verringert. Die Waschmittel bestehen aus einem langkettigen hydrophoben Molekülteil und einer hydrophilen, elektrisch geladenen $-COO^-$-Gruppe. Letztere hydratisiert sich und wird ins Wasser gezogen, während der Kettenrest aus dem Wasser gedrängt wird. Durch diese Oberflächenaktivität wird die Flüssigkeit beweglicher, dringt leichter in kapillare Räume ein und bildet leichter haltbare Schäume. Seifen setzen sich mit den Härtebildnern des Wassers zu unlöslichen Kalk- und Magnesiumseifen um. Diese haben keine Waschwirkung, sind wasserunlöslich und fallen aus. Gegen diesen Mangel helfen waschaktive Substanzen auf ionogener und nichtionogener Basis, die Hauptbestandteil der modernen Waschmittel sind.
Alkylsulfate (Fettalkoholsulfate) $RO-SO_3Me$ (Me = einwertiges Metall) leiten sich von Fettalkoholen ab, die durch Hydrierung von Fettsäuren gewonnen werden. Die Sulfatierung erfolgt mit Schwefelsäure, Chlorsulfonsäure oder SO_3-Dampf.

$$R-CH_2OH + H_2SO_4 \rightarrow R-CH_2-O-SO_3H + H_2O$$

Veresterung von Fettalkohol mit Schwefelsäure

$$R-CH_2-O-SO_3H + NaOH \rightarrow R-CH_2-O-SO_3Na + H_2O$$

Herstellung von Fettalkoholsulfat

Anschließend wird mit Natronlauge zu Fettalkohol neutralisiert. Waschmittel auf dieser Basis reagieren neutral und sind beständig gegen hartes Wasser. Sie werden in Fein- und Haarwaschmitteln sowie Zahnpasten verwendet.
Alkylsulfonate $R-SO_3Me$ haben erhöhte Netzfähigkeit und werden häufig im Gemisch mit anderen Waschrohstoffen eingesetzt. Die Darstellung erfolgt durch Sulfochlorierung oder Sulfoxydation.
Bei der *Sulfochlorierung* werden Paraffinkohlenwasserstoffe (*Mersole*) mit Schwefeldioxid und Chlor unter Lichteinwirkung zu Alkylsulfochloriden umgesetzt. Die anschließende Verseifung mit Alkali ergibt Sulfonate (*Mersolate*).

$$\underset{\substack{|\\ SO_2Cl}}{R-CH-R'} + 2\,NaOH \rightarrow \underset{\substack{|\\ SO_3Na}}{R-CH-R'} + NaCl + H_2O$$

Herstellung von Alkylsulfonat

Sulfoxydation. Hierbei werden geradkettige Kohlenwasserstoffe mit Schwefeldioxid und Sauerstoff in Gegenwart von radikalbildenden Stoffen, wie Ozon, organischen Peroxiden, γ-Strahlen oder UV-Licht, umgesetzt. Letzteres liefert besonders helle Sulfonate, die in Wasser sehr gut löslich sind und biologisch leicht abgebaut werden. Sie eignen sich für flüssige Wasch- und Reinigungsmittel.
Alkylarylsulfonate $R-Ar-SO_3Me$ (R = Alkyl, Ar = Aryl) sind grenzflächenaktive aromatische Waschmittelrohstoffe aus Benzol oder Naphthalin. Dazu gehören vor allem Alkylbenzolsulfonate.

$H_{25}C_{12}$ SO_3Na (Benzolring)

Beispiel eines Alkylbenzolsulfonats

Ihre Darstellung erfolgt durch Sulfonierung der Alkylbenzole mit Schwefeltrioxid. Diese Produkte haben gutes Schäum- und Netzvermögen sowie ausgezeichnete Waschkraft.
Nichtionogene Waschmittel. Unter den nichtionogenen Waschmitteln haben die Äthylenoxidaddukte (Polyglykoläther) die größte Bedeutung. Ausgangsstoffe sind Äthylenoxid und Fettsäuren oder -alkohole. Polyglykoläther sind säure- und salzbeständig und haben ein gutes Waschvermögen.
In das Gebiet der Waschmittel gehören auch Zusätze und Hilfsstoffe, wie eiweißabbauende Enzyme (Proteasen), Polyphosphate (gegen Härtebildner), Perborate (Bleichmittel), Bakterizide u. a.

Paraffine sind Verbindungen, die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen und Molmassen zwischen 275 und 400 aufweisen ($C_{20}H_{42}$ bis $C_{30}H_{62}$). Es sind wachsartige, geruchlose, geschmacklose Substanzen, die in Wasser nicht, in vielen organischen Lösungsmitteln gut löslich sind. Die Gewinnung erfolgt als Erdölfraktion oder bei der Kohleveredlung, z. B. nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren.
Paraffin wird zur Fettsäureherstellung verwendet. Als *Hartparaffin* wird es zur Herstellung von Kerzen, Fußboden- und Lederpflegemittel, Isoliermaterial u. a. eingesetzt. Weichparaffin dient zum Imprägnieren von Zündhölzern und Papier und wird für Salben u. a. verwendet.
Montanwachs wird durch Extraktion aus Rohbraunkohle gewonnen. Das braunschwarze Rohmontanwachs schmilzt zwischen 80 und 90 °C und ist ein Gemisch von Estern, Harzen und Asphalt. Nach Reinigungs- und Veredlungsverfahren (Destillationsbleichung) findet es vielseitige Verwendung als Isoliermaterial, in der Metall- und Holzbearbeitung sowie zur Herstellung diverser Pflegemittel.

4.11.5. Schmierstoffe

Schmierstoffe vermindern die Reibung aufeinander gleitender oder rollender Flächen, indem sie die Reibungspartner trennen und möglichst selbst die Friktionsenergie aufnehmen. Im günstigsten Fall spricht man von „*flüssiger Reibung*", weil nur die Relativbewegung nichtfester Zwischenschichten (Flüssigkeiten, Gase) zu überwinden ist. Dadurch werden Verschleiß und Antriebsenergie erheblich verringert. Es gilt, den geeigneten Schmierstoff nach Anwendungszweck und Umweltbedingungen auszuwählen. Druck, Temperatur, Geschwindigkeit, Atmosphäre, Werkstoffpaarung und Zuführmöglichkeit sind wesentliche Parameter für die Auswahl.
Schmieröle werden überwiegend aus Erdöl gewonnen und je nach Anwendungszweck in verschiedenen Viskositätsstufen bereitgestellt. Es ist eine große Unterscheidung in *Spindel-*, *Maschinen-* und *Zylinderöl* möglich. Mit steigender Viskosität sind Belastung und Temperatur zu erhöhen. Ein wesentliches Anwendungskriterium ist das sog. VT-Verhalten (Viskositäts-Temperatur-Verhalten), weil die Schmierwirksamkeit stark von der Zähflüssigkeit bei Betriebstemperatur abhängt. Da aber nicht alle Betriebsanforderungen von den Mineralölfraktionen gleichmäßig erfüllt werden können, ist eine große Zahl von Spezialschmierölen notwendig. Diese enthalten Zusätze (*Additives* und *Inhibitoren*) zur Beeinflussung von Korrosions- und Temperaturverhalten, sowie Hochdruckzusätze für das Schmierverhalten unter extremen Bedingungen u. a. Diese Zusätze können sowohl aus anorganischen als auch organischen Verbindungen bestehen. Auch *gefettete Öle* (legierte Öle) und *synthetische Öle*, wie Ester- und Silikonöle, können für Sonderzwecke eingesetzt werden.
Schmierfette. Maschinenschmierfette sind seifengedickte Öle, deren Hauptbestandteile i. allg. Mineralöle oder auch Dikarbonsäureester, perfluorierte Kohlenwasserstoffe, Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe, Äthylenpolymerisate, Silikone usw. sind.
Als Seifen verwendet man die fett-, harz-, sulfon- und naphthensauren Salze der Kationen Natrium, Kalzium, Lithium, Aluminium, Blei, Zink, Barium, Magnesium und Silber. Neben den genannten Hauptkomponenten sind noch höhere Alkohole, Wachse und Harze, freies Fett und Wasser im Schmierfett enthalten. Als Stabilisatoren oder Schutzkolloide für Sonderzwecke dienen Zusätze von Leim, Kasein, Kautschuk und Polymerisate. Die konsistenten Fette werden bei entsprechenden konstruktiven Bedingungen sowie zur Abdichtung der Schmierstellen gegen Schmutz und Wasser eingesetzt.
Festkörperschmierstoffe. Zu ihnen zählt man weichere Metalle (Blei, Zinn, Kupfer und Legierungen), Talkum, Graphit, Molybdändisulfid, Bortrioxid, Bleimonoxid, basisches Bleikarbonat, Mennige und Kunststoffe, wie Polytetrafluoräthylen u. a. Die Schmierfähigkeit von Graphit und Molybdändisulfid ist in ihrer Molekularstruktur begründet, die eine Zerteilung bis zu fast molekularen Schichtdicken ermöglicht. Beide Schmiermittel werden auch in feinster Verteilung in Mineralölen, Schmierfetten u. a. Stoffen eingesetzt.
Fertigungshilfsstoffe sind Stoffe aller Aggregatzustände, die zur technischen und wirtschaftlichen Durchführung vieler Fertigungsverfahren eingesetzt werden.
Wäßrige Lösungen von Natrium-, Kalium- oder Ammoniumhydroxid können bei Eisenwerkstoffen zwar als Rostschutzmittel dienen, werden aber wegen ihrer hohen Alkalität, ihrer Salzbildung und physiologischer Nebenwirkungen kaum verwendet. Letzteres trifft auch auf Nitrite und Chromate zu. Lösungen mit Aminen, Fettsäuren und neuerdings Schwermetallsalze vermeiden die vorher genannten Nachteile bei verbessertem Schmiereffekt.
Emulsionen entstehen durch Dispersion (Zerteilung) einer Flüssigkeit, dem *Emulsol*, in Form kleiner Tröpfchen in einer anderen, mit ihr nicht mischbaren Flüssigkeit. Das *Emulsol* besteht aus Mineralöl, *Emulgatoren* (Seifen, nichtionogene Stoffe), *Lösungsvermittler* (meist Alkohole) und Inhibitoren gegen korrosive und bakterizide Einflüsse. In Sonderfällen werden noch *Additives* auf Schwefel-, Chlor- oder Phosphorbasis zugesetzt. Als sog. Schneidöle werden nach

historischer Folge Fett-, Mineral- und synthetische Öle eingesetzt. Zur noch besseren Einsatzanpassung für die verschiedenen Bearbeitungsverfahren, besonders bei Metall, werden legierte Öle verwendet. Legierungskomponenten zum meist mineralischen Grundöl sind Fettöle, Fettalkohole, Polybutylene, alkylierte Polystyrole und sog. Hochdruckadditives (Schwefel-, Chlor- oder Phosphorverbindungen), die Viskositäts-Temperatur-Verhalten, Alterungsbeständigkeit, Korrosionsneigung und Schmierwirkung bei gegebenen Bedingungen in weiten Grenzen beeinflussen.
Zum Hilfsstoffsortiment sind auch pastöse Aufbereitungen mit ähnlichen Zusätzen, bis hin zum Festkörperschmiermittel, zu zählen. Selbst Metalle und bestimmte Glassorten spielen bei Umformverfahren eine bedeutende Rolle.

4.12. Pigmente — Farbstoffe — Anstrichstoffe — Klebstoffe

4.12.1. Pigmente

Pigmente sind in der Natur vorkommende anorganische und organische Stoffe, die als Farbmittel verwendet werden und in Lösungs- oder Bindemitteln unlöslich sind.
Natürliche anorganische Pigmente (Erdfarben) sind Mineralien, wie Kreide, Ocker, Schwerspat, Umbra, gebrannte Siena, Oxidrot u. a. Sie werden durch mechanische Vorgänge, wie Zerkleinern, Waschen, Schlämmen, Trocknen und Mahlen, aufbereitet.
Künstliche anorganische Pigmente (Mineralfarben), wie Bleiweiß, Titanweiß, Kadmium- und Kobaltfarben, Mennige, Ultramarin, Pariser Blau, Chromgrün, Bronzen, Ruß u. a. stellt man durch chemische und physikalische Umwandlungen aus anorganischen Grundstoffen her. Der chemische Aufbau der Pigmente, Kristallform, Teilchengröße, Farbton, Farbstärke und Lichtechtheit sind bestimmend für ihren Einsatz. Weiterhin erstrebt man eine vollständige Unlöslichkeit, aber gute Verteilung im Bindemittel.

4.12.2. Farbstoffe

Farbstoffe sind organische Substanzen, die in Lösungs- oder Bindemitteln löslich, aber auch unlöslich sein können. Man kennt über 3000 synthetisch dargestellte Farbstoffe, von denen ≈ 500 Bedeutung haben.
Natürliche Farbstoffe auf tierischer und pflanzlicher Basis haben keine industrielle Bedeutung mehr.
Synthetische Farbstoffe sind meist Abkömmlinge aromatischer oder heterozyklischer Verbindungen.
Azofarbstoffe. Diese Farbstoffe haben die allgemeine Formel R—N=N—R' mit der typischen —N=N— Azogruppe. Farbstoffmoleküle mit 2 bzw. 3 Azogruppen bezeichnet man als *Bisazo-* bzw. *Trisazofarbstoffe*. Die Azofarbstoffe entstehen durch Kuppeln von Diazoniumverbindungen mit Aminen oder Phenolen. Ein typischer Vertreter der Azofarbstoffe ist das β-Naphtholorange.

Anthrachinonfarbstoffe ist der Sammelbegriff für eine große Gruppe wasch- und lichtechter Farbstoffe, die aus dem Anthrazen des Steinkohlenteers gewonnen werden.

Anthrachinon

Saure Farbstoffe sind die entsprechenden Amino- oder Hydroxylderivate des Anthrachinongrundkörpers.
Anthrachinonküpenfarbstoffe. Die Anthrachinone werden durch Reduktion in die Dihydroderivate überführt und mit Luft zum unlöslichen Farbstoff zurückoxydiert. Zu dieser Gruppe gehört auch ein Teil der Indanthrenfarbstoffe.
Triphenylmethanfarbstoffe sind basische Farbstoffe, deren leuchtende Farben nur wenig licht- und waschecht sind. *Methyl-* und *Kristallviolett* sind die Triphenylmethanfarbstoffe, die zur Herstellung rotvioletter Tinten, Kopierstifte und Farbbänder für Schreibmaschinen genutzt werden.

Kristallviolett

Schwefelfarbstoffe entstehen durch Erhitzen von Amino- und Nitrophenol, Diaminobenzol, Dinitronaphthalin u. a. mit Alkalipolysulfiden. Nicht zu den Schwefelstoffen zählen Thioindigofarbstoffe und Thiazole. Schwefelfarbstoffe sind in Wasser unlöslich und werden erst mit Na-

triumsulfid wasserlöslich. Nach dem Färben bildet sich der unlösliche Farbstoff durch Oxydation zurück.

Farbstoffklassen nach dem Färbeverfahren. *Direktfarbstoffe*, auch direktziehende oder substantive Farbstoffe genannt, erfordern nur eine direkte Färbung durch Eintauchen des zu färbenden Materials in die wäßrige Farbstofflösung, die *Flotte*.

Reaktivfarbstoffe enthalten eine farbgebende und eine reaktionsbedingende Komponente. Letztere ermöglicht eine feste Verbindung zwischen Faser und Farbstoff.

Beizenfarbstoffe werden nur von Fasern angenommen, die zuvor mit einer „*Beize*" fixiert werden. Dazu gehören *Albumin* in der Kattundruckerei oder *Tannin* für basische Farbstoffe. Beizenfarbstoffe sind Farbstoffe, die mit Metalloxiden unlösliche Komplexe bilden können. Wolle wird z. B. mit einer Lösung von Aluminiumazetat getränkt und durch Dämpfen der organische Rest verflüchtigt. Das hydrolysierte Aluminiumsalz wird mit Alizarin behandelt und ergibt einen farbigen, unlöslichen Komplex, der fest an den Fasern haftet.

Aluminium-Alizarinfarblack

Entwicklungsfarbstoffe sind wasserunlösliche Farbstoffe, die auf der Faser aus wasserlöslichen Bestandteilen erzeugt werden.

Küpenfarbstoffe werden erst durch Reduktion in alkalischer Lösung wasserlöslich. Der Farbstoff wird von der Faser absorbiert und durch anschließende Oxydation in die unlösliche Form überführt.

$$O{=}C_xH_yN_z{=}O \underset{\text{Oxydation}}{\overset{\text{Reduktion}}{\rightleftharpoons}} HO{-}\underset{|\atop H}{C_x}H_y\underset{|\atop H}{N_z}{-}OH$$

Küpenfarbstoff (unlöslich) — *Leukoverbindung des Farbstoffs (löslich)*

Die *Küpe* war früher ein großes Holzgefäß, in dem durch Gärungsprozesse die Reduktion der Farbstoffe erfolgte.

Dispersionsfarbstoffe sind in Wasser schwerlösliche Farbstoffe, die als Dispersion zum Färben von synthetischen Fasern verwendet werden.

4.12.3. Anstrichstoffe

Anstrichstoffe bestehen i. allg. aus Farbkörpern, Bindemittel, Lösungsmittel und z. T. noch eigenschaftsverbessernden Zusätzen. Farbkörper und Bindemittel bilden eine Dispersion.

Anstrichstoffe mit wasserhaltigem Bindemittel. *Kalk*, *Wasserglas* sowie tierische und pflanzliche Leime (*Dextrin*, *Glutin*, *Kasein*) sind Bindemittel für den Innen- und z. T. auch Außenanstrich. Zu dieser Gruppe zählen auch die wasserlöslichen polymeren Bindemittel, wie Zelluloseäther (Methylzellulose), Kunststoffdispersionen und -emulsionen (*Latex*). Einige dieser Anstrichstoffe bilden wasserunlösliche Schichten nach der Verarbeitung, z. B. Latex, weshalb sie auch für Außenanstriche oder feuchte Räume geeignet sind.

Anstrichstoffe mit ölhaltigem Bindemittel und organischem Lösungsmittel. Die Ölfarben bestehen aus Aufbereitungen von Pigmenten, trocknenden Ölen (Firnis, Mohnöl u. a.), Lösungsmittel und Trocknungsbeschleuniger, *Sikkative* aus Metallstearaten und -oleaten. Die Farbschichttrocknung beruht auf einer vernetzenden Oxydation bzw. Polymerisation sowie der Verdunstung des Lösungsmittels. Die *Öllacke* enthalten außerdem noch Natur- und Kunstharze, wie Kolophonium, Kopal, Dammar, Alkydharz, Mischester der Dikarbonsäuren (z. B. Phthalsäure) u. a. *Firnis* ist ein bis zu 5 % Sikkativ enthaltendes geblasenes (oxydiertes) Leinöl.

Anstrichstoffe mit ölfreiem Bindemittel und organischem Lösungsmittel. Bei den ölfreien Natur- und Kunstharzen trocknet der Film durch Verdunstung des Lösungsmittels (physikalische Trocknung). Hierher gehören die mit Lösungsmittel aufbereiteten Bindemittel Schellack, Zellulose, Chlorkautschuk, Polyvinylchlorid, Styrol u. a.

Anstrichstoffe aus Phenol-, Harnstoff- und Melaminharz. In diese Gruppe fallen Polykondensate auf Formaldehydbasis mit Phenol, Harnstoff und Melamin. Die flüssigen Vorkondensate (*Resolzustand*) trocknen durch Wärmeeinwirkung (*Einbrennlacke*), wobei sich die Polykondensation fortsetzt. Der *Resitzustand* garantiert chemikalienresistente Duroplastschichten.

Reaktionsanstrichstoffe. Bei diesen Anstrichmitteln ist das Lösungsmittel gleichzeitig Reaktionspartner und bildet den Farbfilm mit. Polyurethanlacke werden als Zweikomponenten-Anstrichmittel geliefert, die durch Variation des Mischungsverhältnisses glasharte bis zähweiche Überzüge ergeben. Auch mit ungesättigten Polyestern lassen sich ähnliche Anstrichsysteme erreichen.

Lösungsmittel. Beim Lösungsvorgang darf sich weder der lösende noch der gelöste Stoff chemisch verändern. Die filmbildenden Stoffe werden durch Lösungsmittel in die gewünschte Verarbeitungsform gebracht und müssen in relativ kurzer Zeit verdunsten (Tab. 4.12.3-1).

Tab. 4.12.3-1 *Lösungsmittel für verschiedene Anstrichstoffe*

Anstrichstoff	Lösungsmittel
Öl-, Alkydharzfarben, Öllacke	Lackbenzin, Terpentin, Xylol, Dekalin
Nitrolacke	Äthanol, Butanol, Toluol, Butyl-äthylazetat
Naturharze	Äthanol, aromatische Verbindungen
Kunstharze	Ester-Aromatengemische

4.12.4. Druckfarben

Druckfarben bestehen im wesentlichen aus Bindemittel und Farbstoffen oder Pigmenten. Als Bindemittel werden vor allem Leinölfirnis sowie Natur- und Kunstharze verwendet. Für Zeitungsrotations- und Werkfarben werden bituminöse Stoffe in Verbindung mit Mineralölen oder trocknenden Ölen als sog. *Kompositionsfirnisse* eingesetzt. Sie wirken nicht nur als Bindemittel, sondern gleichzeitig als farbvertiefende Komponente. Als Bindemittel mit Leinöl werden heute vor allem Ester-, Alkyd-, Phenol- und Kresolharze, Polyvinylazetat, Zelluloseester und -äther eingesetzt. Zur Herstellung farbiger Druckfarben werden weiße anorganische Farbträger, z. B. Barytweiß, für wasserlösliche synthetische Farbstoffe genutzt. Diese *Substrate* bezeichnet man als *Farblacke*. Sie sind wasserunlöslich.

Die Druckfarben sind sowohl den technologischen Bedingungen der Druckverfahren (vgl. 17.2.) als auch den unterschiedlichen Bedruckstoffen angepaßt. Bindemittel für *Buch-* und *Offsetdruckfarben* sind Leinöl-, Kunstharz- und Kompositionsfirnisse. Für *Tiefdruckfarben*, die sehr niedrigviskos sind, dienen Lösungen von Natur- bzw. Kunstharz oder Bitumen in Toluol oder Xylol als Bindemittel. Diese leichtflüchtigen Stoffe verlangen besondere technologische Vorkehrungen (vgl. 17.2.3.). Bindemittel für *Flexodruckfarben* sind Wasser-Spiritus-Glyzerin-Gemische, mit denen auch nichtsaugende Materialien bedruckt werden können. Für die hochviskosen *Siebdruckfarben* werden wasserhaltige Bindemittel eingesetzt, als Pigmente lösungsmittelechte Farbstoffe, Farblacke und Mineralfarben. *Spezialdruckfarben* werden für eng abgegrenzte Bereiche benötigt. Zu ihnen zählen z. B. Sicherheits-, Kopierdruck-, Karbondruck- und Bronzedruckfarben.

Die *Farbtrocknung* beeinflußt wesentlich die Qualität der Druckfarben. Die Trocknung der Farben kann durch Wegschlagen (Penetration) des Bindemittels in den saugfähigen Bedruckstoff, chemische Reaktion (Oxydation, Polymerisation), Verdunsten des Lösungsmittels oder eine Kombination aller Arten erfolgen. Um die Trocknungsgeschwindigkeit zu erhöhen, werden sog. *Trockenstoffe* als Trocknungsbeschleuniger zugesetzt, die bei oxydativ trocknenden Firnissen wirken. Das sind Blei-, Mangan- und Kobaltsalze aliphatischer Fettsäuren, die als Katalysator wirken. Einfluß auf den Trocknungsverlauf haben weiterhin Temperatur, Papierfeuchte und *p*H-Wert des Druckpapiers.

4.12.5. Klebstoffe

Klebstoffe sind nichtmetallische Werkstoffe, die feste Körper durch Adhäsion und Kohäsion verbinden können, ohne daß sich Gefüge und Eigenschaften der zu verbindenden Körper wesentlich ändern. Der Begriff Klebstoff umfaßt alle hierfür geeigneten Verbindungen und Gemische.

Tierische Leime. *Glutin-Leime* werden aus Haut, Knochen oder Leder gewonnen und warm oder kalt verarbeitet.

Kasein-Leime sind ein Gemisch aus Kasein, Wasser und Alkali, z. B. Kalziumhydroxid. Sie werden kalt verarbeitet.

Albumin-Leime enthalten Blutalbumin von Schlachttieren.

Pflanzliche Leime. Hierzu gehören *Eiweißleime* aus Weizenkleber oder Sojaeiweiß, *Stärkeleime* (Dextrin) sowie Pflanzengummi, Pektine, Naturharze und Kautschukleime.

Stärkeleime erhält man durch Behandeln von Stärke mit Natronlauge und anschließender Neutralisation mit Salpetersäure, zur Konservierung wird Formaldehyd zugesetzt. Sie werden vorwiegend in der Papierindustrie und Buchbinderei verwendet.

Synthetische Leime sind meist Kunstharze oder Zelluloseester, die mit organischen Lösungsmitteln das Klebemittel bilden. Die Klebestellen werden bis $\approx 130\,°C$ erwärmt und ergeben dann eine gehärtete, wasserfeste Verbindung. Mit synthetischen Leimen lassen sich fast alle Werkstoffe kleben.

Anorganische Klebstoffe, z. B. Wasserglas, Sulfitablauge, Metalloxide, werden in Sonderfällen zum Kleben benutzt.

4.13. Explosivstoffe

Explosivstoffe werden bei mechanischer oder thermischer Einwirkung zur schnellen chemischen Umsetzung (Verbrennung) angeregt. Es bilden sich gasförmige Reaktionsprodukte, deren plötzliche Ausdehnung und Druckwirkung als Explosion bezeichnet wird und mechanische Arbeit verrichtet. Man unterscheidet je nach langsamer (Deflagration) und schneller Verbrennung (Detonation) in Treib- und Sprengstoffe.

Treibstoffe deflagrieren, und ihre größte Umsetzungsgeschwindigkeit liegt bei ≈ 600 m/s. Ein typischer Vertreter ist *Schwarzpulver*. Es ist eine Mischung von Kalisalpeter (75 %), Schwefel (10 %) und Holzkohle (15 %). 1 kg Schwarzpulver erzeugt unter Normalbedingungen ≈ 280 ℓ Gas (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoff und Schwefeldioxid).
Einsatzgebiete der Treibmittel sind die Gewinnung rißfreier Gesteinsquader im Steinbruch, Sprengungen im Kalibergbau, die Pyrotechnik, die Herstellung von Signalmunition, der Antrieb kleiner Raketen und die Herstellung von Zündschnüren.
Schwarzpulverähnliche Mischungen enthalten noch Holzmehl, Pech oder kresolsulfonsaures Natrium. Wird statt Kalisalpeter Natronsalpeter im Schwarzpulver verwendet, erhält man *Sprengsalpeter*, der in seiner Wirkung schwächer ist als Schwarzpulver.

4.13.2. Sprengstoffe

Die Umsetzungsgeschwindigkeiten der Sprengstoffe übersteigt 1 000 m/s. Sie wirken zertrümmernd.
Salpetersäureester haben die energiereichsten Sprengstoffbestandteile und bringen andere energieliefernde Systeme auf eine hohe Umsetzungsgeschwindigkeit.
Zur Darstellung von *Glyzerintrinitrat* (unkorrekt *Nitroglyzerin*) wird wasserfreies Glyzerin mit einem Überschuß von Nitriersäure (50 bis 55 % Salpetersäure und 45 bis 50 % Oleum) umgesetzt. Das Glyzerintrinitrat scheidet sich ab und wird durch anschließendes Waschen mit Wasser und Soda gereinigt.

$$CH_2OH-CHOH-CH_2OH + 3\,HNO_3 \rightarrow CH_2{-}O{-}NO_2-CH{-}O{-}NO_2-CH_2{-}O{-}NO_2 + 3\,H_2O$$

Nitrieren von Glyzerin

Es ist farblos und bei Normalbedingungen haltbar. Wie die anderen flüssigen Salpetersäureester ist es schlag- und reibungsempfindlich, so daß der Transport schwierig ist. Glyzerintrinitrat gehört zu den hochbrisanten Sprengstoffen mit einer Detonationsgeschwindigkeit von 7 600 m/s und einem Normalvolumen von 715 ℓ/kg.

$$C_3H_5(ONO_2)_3 \rightarrow 3CO_2 + 5/2\,H_2O + 1/4\,O_2 + 3/2\,N_2$$

Zersetzung von Glyzerintrinitrat bei der Detonation

Es wird nie in reinem Zustand verwendet, sondern zur Herstellung von Dynamit und Sprenggelatine genutzt.
Glykoldinitrat (unkorrekt *Nitroglykol*) wird in Mengen von 20 bis 40 % anderen Sprengstoffen zugesetzt, um deren Gefrieren zu verhindern. Die Darstellung erfolgt analog dem Glyzerintrinitrat mit Äthylenglykol.

$$CH_2OH-CH_2OH + 2\,HNO_3 \rightarrow CH_2{-}O{-}NO_2-CH_2{-}O{-}NO_2 + 2\,H_2O$$

Nitrieren von Glykol

Zellulosenitrate (unkorrekt *Nitrozellulosen*) entstehen durch Veresterung von Zellulosen mit Nitriersäure (vgl. 4.10.2.). In Abhängigkeit vom Veresterungs- und Polymerisationsgrad werden sie für Spreng- und Schießstoffe mit einem Stickstoffgehalt zwischen 12 und 13,4 % verwendet.
Kollodiumwolle ist eine niedrig nitrierte Zellulose (Stickstoffgehalt bis 12 %), die für gelatinöse Sprengstoffe verwendet wird.
Schießbaumwolle (hochnitrierte Zellulose) wird im Gemisch mit Kollodiumwolle und durch Behandeln mit einem Alkohol-Äther-Gemisch gelatiniert und als Treibladungspulver verwendet.
Nitroverbindungen. Diese Sprengstoffe sind chemisch beständiger, da sie keine Esterverbindungen, sondern echte Nitroverbindungen darstellen. Bedeutung haben die aromatischen Nitroverbindungen.
Pikrinsäure (2,4,6,-Trinitrophenol) verbrennt nach der Zündung langsam mit rußender Flamme. Gegen Reibung, Stoß, Schlag und plötzliche Erwärmung ist sie weniger empfindlich als die Salpetersäureester.
Metallpikrate dagegen sind sehr stoßempfindlich.

Pikrinsäure (links) und Trinitrotoluol (rechts)

Trinitrotoluol (TNT) ist der bedeutendste Sprengstoff in der Gruppe der Nitroverbindungen. Gegen Erwärmung ist TNT beständig; die

Detonation von TNT-Preßkörpern wird durch Sprengkapselzündung erreicht.
Weitere Nitroverbindungen sind: Hexanitrodiphenylamin, Dinitrotoluol, Tetranitromethylanilin und Hexogen (Hexahydro-1, 3, 5-trinitro-s-triazin).
Dynamite. *Gurdynamit* ist der älteste von *A. Nobel* entwickelte brisante Gesteinssprengstoff. Er besteht aus 75 % Glyzerintrinitrat und 25 % trockener Kieselgur. Der jetzige Dynamit enthält 65 % gelatiniertes Glyzerintrinitrat, 27 % Natronsalpeter und 8 % Holzmehl. In dieser Mischung besteht eine ausgeglichene Sauerstoffbilanz, d. h. der gesamte Kohlenstoff wird zu Kohlendioxid und der Wasserstoff zu Wasser verbrannt.
Durch diese Kombination wurde das hochempfindliche Glyzerintrinitrat zu einem Sprengstoff, der schlag-, stoß- und erschütterungsunempfindlich ist und sicher gehandhabt werden kann.
Ammonsalpetersprengstoffe setzen sich aus Ammoniumnitrat NH_4NO_3 und Glyzerintrinitrat zusammen. Die gelatinösen Sprengstoffe sind dem Dynamit ähnlich, bieten jedoch gegen Schlag und Erhitzung größere Sicherheit (*Sicherheitssprengstoffe*). Zu dieser Gruppe gehören auch die sog. *Wettersprengstoffe* im Bergbau, denen Steinsalz zugesetzt wird, damit explosionstemperatur und -druck gesenkt werden. Die Wettersprengstoffe bestehen aus Kalisalpeter, Ammoniumchlorid, „Sprengöl" (Glyzerintrinitrat, Nitrodiäthylenglykol, Dinitrodiglykol).
Sprengmischungen mit flüssigem Sauerstoff. Die *Oxyliquite* bestehen aus einem brennbaren Material, das mit flüssigem Sauerstoff angereichert ist.
Brennbare Komponenten können sein: Holzmehl, Baumwolle, Ruß, Holzkohle oder Gemische mit Kohlenwasserstoffen, z. B. Naphthalin, Pech und Benzin. Die brennbaren Stoffe befinden sich in einem Baumwoll- oder Papierbeutel und werden mit flüssigem Sauerstoff gesättigt. Die fertige Ladung wird mit einer Sprengkapsel versehen, in das Bohrloch versenkt und elektrisch gezündet.

4.13.3. Zündstoffe

Zündstoffe sind Sprengstoffe, wie Bleiazid, Quecksilberfulminat u. a., die bei Einwirkung geringer thermischer oder mechanischer Energie rasch zerfallen. Die dabei frei werdende Energie bringt trägere und schwer anregbare Sprengstoffe zur Detonation (*Initialsprengstoffe*).
Schwarzpulverzündschnur ist ein mit Leim bestrichener und durch Schwarzpulver gezogener Baumwollfaden oder eine Schnur mit einer Schwarzpulverseele. Sie ermöglicht die Zündung aus sicherer Entfernung.

5. Technik der Hochpolymere

Hochpolymere sind natürlich vorkommende oder durch chemische Umsetzungen gewonnene organische oder anorganische Stoffe. Sie sind aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften wichtige Roh-, Hilfs- oder Werkstoffe für alle Zweige der Volkswirtschaft. Während bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts vorwiegend nur natürliche Hochpolymere vorhanden waren (z. B. Zellulose, Eiweiße, Silikate in Form von Holz, Leder, Gesteinen), wurden vor allem in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts eine große Anzahl unterschiedlichster Hochpolymere entwickelt und technisch genutzt. Durch Variation der Zusammensetzung und der Struktur der Makromoleküle lassen sich gezielt Hochpolymere „nach Maß" synthetisieren. Es können sowohl die chemischen, physikalischen, physiologischen als auch die Verarbeitungseigenschaften durch die Synthese beeinflußt werden.

Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Hochpolymere resultiert aus ihrer hohen Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und Chemikalien, ihrer geringen spezifischen Masse bei guten physikalischen Eigenschaften und ihrer leichten, oftmals einstufigen Verarbeitbarkeit zu Erzeugnissen verschiedenster Strukturen. Durch Mischen verschiedener Hochpolymere oder Kombination der Hochpolymere mit anderen Werkstoffen lassen sich weitere Anwendungsgebiete erschließen. Die Einsatzgebiete reichen von der Raketen- bis zur Feinwerktechnik, von der Landwirtschaft bis zur Humanmedizin (vgl. 5.1.3.).

Da hochpolymere Werkstoffe aus Kohle, Erdöl oder Erdgas und unter Einsatz großer Mengen Energie gewonnen werden, ist es eine volkswirtschaftliche Notwendigkeit, sie sparsam und ihrem Eigenschaftsbild entsprechend einzusetzen. Die Wiederverwendung von Sekundärmaterial ist in den meisten Fällen möglich und volkswirtschaftlich zweckmäßig (vgl. 5.1.4.). Viele Hochpolymere sind gegenüber Umwelteinflüssen (UV-Licht, Bakterien usw.) sehr beständig, ein natürlicher Abbau von Abfällen erfolgt meist nicht in vertretbaren Zeiträumen.

Thermoplaste
Fadenmoleküle
amorph
teilkristallin
Duroplaste
Raumnetzmoleküle, amorph

Abb. 5.1.1-1 *Molekülstruktur der Plaste*

5.1. Plastwerkstoffe

5.1.1. Eigenschaften der Plaste

Die Plastwerkstoffe lassen sich aufgrund ihrer Molekülstruktur in lineare, verzweigte und vernetzte Polymere einteilen. Aus dieser Molekülgestalt resultieren unterschiedliche verarbeitungs- und anwendungstechnische Eigenschaften. Lineare und verzweigte Plaste werden als *Thermoplaste (Plastomere)* bezeichnet. Die *Duroplaste (Duromere)* bestehen aus vernetzten Makromolekülen (Abb. 5.1.1-1). Hinsichtlich ihrer physikalischen Struktur können Plastwerkstoffe *amorph* und *teilkristallin* vorliegen. Der amorphe Zustand zeigt ein glasklares Erscheinungsbild. Der Grad der Teilkristallinität ist von der Art der Plastwerkstoffe und von den Verarbeitungsparametern bei der Herstellung von Formteilen und Halbzeugen abhängig.

Die Plastformmassen werden entweder in reiner Form (ungefüllt) oder unter Anwendung von Füllstoffen bzw. Verstärkungsmaterialien eingesetzt. Sie können als kompakte Werkstoffe bzw. in geschäumtem Zustand (d. h. mit Zellstruktur) verwendet werden. Bei diesen Schaumstoffen unterscheidet man eine offenzellige oder eine geschlossene Porenstruktur. Ausgehend von diesen Grundeigenschaften lassen sich durch Rezepturvarianten unter Zusatz geeigneter Hilfsstoffe die Plastwerkstoffe in ihrem Eigenschafts-

bild noch weitgehend variieren. Die Rezepturzusammensetzung ist durch verarbeitungs- und anwendungstechnische Forderungen determiniert.

Physikalische Eigenschaften der Plastwerkstoffe sind abhängig von der Struktur der Makromoleküle, von der Rezepturzusammensetzung sowie von den Verarbeitungs- und gegebenenfalls Anwendungsbedingungen.

Thermoplaste können durch Energiezufuhr reversibel zum plastischen Fließen gebracht werden. Die Fixierung der Formteil- und Halbzeuggestalt erfolgt durch anschließende Abkühlung. Bei einer optimalen Verarbeitung erfolgt dabei keine Veränderung der Makromoleküle (Tab. 5.1.1-2).

Tab. 5.1.1-2 *Kurzzeichen für Thermoplaste*

Thermoplaste	Kurzzeichen
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere	ABS
Acrylnitril-Methylmethacrylat-Copolymere	AMMA
Celluloseacetat	CA
Celluloseacetobutyrat	CAB
glasfaserverstärkte Plaste	GFP
Polyacrylnitril	PAN
Polyäthylen	PE
Polyäthylen niedriger Dichte	PE-ND
Polyäthylen mittlerer Dichte	PE-MD
Polyäthylen hoher Dichte	PE-HD
Polycarbonat	PC
Polytrifluorchloräthylen	PCTFE
Polyisobutylen	PIB
Polymethylmethacrylat	PMMA
Polyolefine	PO
Polyoxymethylen (Polyformaldehyd)	POM
Polyäthylenterephthalat	PETP
Polyphenylenoxid	PPO
Polypropylen	PP
Polystyrol	PS
Polytetrafluoräthylen	PTFE
Polyurethan	PUR
Polyvinylacetat	PVAC
Polyvinylalkohol	PVAL
Polyvinylbutyral	PVB
Polyvinylchlorid	PVC
Polyvinylchlorid, weichmacherfrei	PVC-H
Polyvinylchlorid, weich	PVC-W
Polyvinylidenchlorid	PVDC
Styrol-Acrylnitril-Copolymere	SAN
Styrol-Butadien-Copolymere	SB

Tab. 5.1.1-3 *Kurzzeichen für Duroplaste*

Duroplaste	Kurzzeichen
Dicyandiamidformaldehyd	DD
Epoxidharze	EP
glasfaserverstärkte Plaste	GFP
glasfaserverstärkte ungesättigte Polyester	GUP
Harnstofformaldehyd	UF
Melaminformaldehyd	MF
Phenolformaldehyd	PF
Polyurethan	PUR
ungesättigte Polyester	UP
Vulkanfiber	Vf

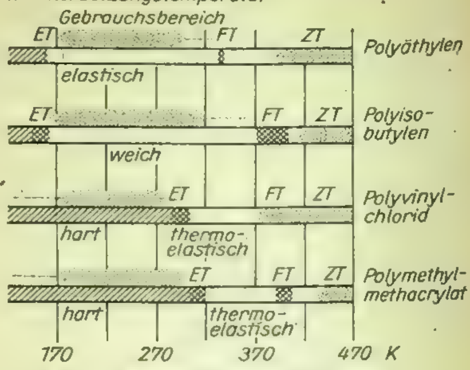


Abb. 5.1.1-4 *Zustandsbereiche thermoplastischer Polymere*

Duroplaste durchlaufen bei der Verarbeitung eine plastische Phase, während der sie geformt werden können. Dabei läuft ein chemischer Prozeß ab (Vernetzungsvorgang). Die entstehenden Makromoleküle sind vernetzt und auch durch Energiezufuhr nicht wieder zu erweichen (Tab. 5.1.1-3).

Aus den unterschiedlichen strukturellen Voraussetzungen resultieren spezielle Verhaltensweisen der genannten Plastwerkstoffgruppen. So sind Thermoplaste hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften stark temperaturabhängig und durch bestimmte Zustandsbereiche zu charakterisieren (Abb. 5.1.1-4). Bei tiefen Temperaturen liegt ein spröder sog. *Glaszustand* vor. Mit steigender Temperatur nimmt die mechanische Festigkeit kontinuierlich ab, und nach einem Übergangsbereich (Glas-, Einfrier- oder Erweichungstemperatur) zeigt das Werkstoffverhalten einen thermoelastischen Charakter. In diesem Gebiet weist der polymere Festkörper eine erhöhte Flexibilität auf. Eine weitere Energiezufuhr lockert zusätzlich die Bindungskräfte zwischen den Makromolekülen, wodurch das Material oberhalb der Fließtemperatur in den thermoplastischen Zustand übergeht. Bei weiterer Temperaturerhöhung wird die Zersetzungstemperatur erreicht, die durch den beginnenden Abbau der Makromoleküle gekennzeichnet ist. Duroplaste verhalten sich bei Energiezufuhr bis zur Erreichung der Zersetzungstemperatur ausgesprochen stabil, d. h. der Glaszustand bleibt nahezu bis zum Zersetzungstemperaturbereich erhalten. Daraus resultiert eine weitgehende Konstanz der mechanischen Eigenschaften bis zu diesem Umwandlungsgebiet. Damit wird deutlich, daß Duroplaste auch eine höhere Wärmeformbeständigkeit gegenüber Thermoplasten aufweisen.

Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Plastwerkstoffe ist bei ihrer Verarbeitung und Anwendung zu beachten.
Für Plaste ist aufgrund ihrer organischen Grundstruktur ein günstiges Elektroisolationsvermögen kennzeichnend. Die elektrischen Eigenschaften können aber durch Rezepturzusätze oder Veränderungen der Makromolekülstruktur während der Verarbeitung und Anwendung der Plastwerkstoffe verändert werden.
Die optischen Eigenschaften der Plastwerkstoffe sind abhängig vom amorphen oder teilkristallinen Charakter des jeweiligen Plasts, von den Rezepturbestandteilen sowie von der Oberflächenqualität der Formgebungswerkzeuge bei der Verarbeitung. Bezüglich der Anwendung ist zu beachten, daß sich die optischen Eigenschaften aufgrund einer verhältnismäßig niedrigen Kratzfestigkeit im Laufe der Zeit verändern können.
Die Strahlungsbeständigkeit der Plastwerkstoffe ist aus anwendungstechnischer Sicht zu berücksichtigen, da bei Einfluß energiereicher Strahlen mit einer Schädigung der Makromolekülstruktur zu rechnen ist, woraus eine Eigenschaftsänderung resultiert. In einigen Fällen wird dieses Werkstoffverhalten gezielt zur Verbesserung der Polymereigenschaften genutzt (Vernetzungsvorgänge, Strahlungspolymerisation).
Chemische Eigenschaften. Der chemische Aufbau der Plastwerkstoffe bestimmt deren Verhaltensweisen gegenüber chemischen Reagenzien. Die größte Beständigkeit gegenüber chemischen Einflüssen zeigen die carbokettigen Polymere, deren Molekülkette ausschließlich aus Kohlenstoffatomen besteht.

–C–C–C–C–C–C–C–C–C–C–

Die heterokettigen Polymere enthalten in der Hauptkette des Makromoleküls außer Kohlenstoff noch Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff usw.

–C–C–C–C–N–C–C–C–C–N–
–C–C–C–O–C–C–C–C–O–C–

An diesen Stellen ist mit einem Angriff chemischer Reagenzien zu rechnen, wodurch die Makromolekülstruktur entscheidend verändert werden kann. Daher ist bei der Anwendung derartiger Plastwerkstoffe eine systematische Auswahl unter dem Gesichtspunkt möglicher chemischer Einflüsse während des Plasteinsatzes zu treffen.
Auch die *funktionellen Gruppen*, die den Charakter vieler Plastwerkstoffe wesentlich bestimmen, können chemischen Veränderungen unterliegen, die erhebliche Eigenschaftsveränderungen verursachen. Darüber hinaus hängt die chemische Beständigkeit der Plastformteile und -halbzeuge von Diffusionsvorgängen ab, so daß sowohl die Temperatur als auch die Wanddicke der Plasterzeugnisse von entscheidender Bedeutung für die chemischen Verhaltensweisen sein können. Schließlich müssen unterschiedliche Reaktivitäten der Rezepturbestandteile bei der Beurteilung der chemischen Eigenschaften der Plastwerkstoffe berücksichtigt werden.
Gegenüber Lösungsmitteln sind die vernetzten Duroplaste durchweg wesentlich beständiger als die linearen oder verzweigten Thermoplaste.
Physiologische Eigenschaften. In einigen Anwendungsfällen spielen die physiologischen Eigenschaften der Plastwerkstoffe eine wichtige Rolle, so z. B. in der Medizintechnik, Verpackungsmittelindustrie usw. Die Auswahl der Polymerwerkstoffe hat so zu erfolgen, daß beim Kontakt mit dem menschlichen Körper oder mit flüssigen oder festen Medien, die später mit dem menschlichen Körper in Berührung kommen könnten, keinerlei Möglichkeit zum Übergang gefährdender oder toxikologischer Bestandteile auf den menschlichen Organismus gegeben ist. Aufgrund ihrer Makromolekülstruktur sind die Polymerwerkstoffe in dieser Hinsicht weitgehend ohne Bedenken einsetzbar. Es ist jedoch zu beachten, daß bei unsachgemäßer Verarbeitung niedermolekulare Spaltprodukte auftreten können und daß Rezepturzusätze die physiologischen Eigenschaften ungünstig verändern können.

5.1.2. Verarbeitungsmethoden der Plaste

Aufbereitung der Formmassen. Die Plastwerkstoffe können in reiner Form oder in Kombination mit Plasthilfsstoffen eingesetzt werden. In den meisten Fällen sind den Verarbeitungsprozessen bestimmte Verfahrensstufen vorgelagert, die man unter dem Sammelbegriff „*Aufbereitungsprozesse*" zusammenfassen kann.
Das Ziel der Aufbereitungsvorgänge besteht darin, ein einheitlich gemischtes, weitgehend homogenes Produkt mit einer möglichst gleichmäßigen geometrischen Gestalt als Voraussetzung für die nachfolgenden Verarbeitungsprozesse zu erhalten.
Die Aufbereitung der Plastformmassen erfolgt im Hinblick auf
– Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften,
– Verbesserung der Werkstoffeigenschaften,
– Senkung des Materialeinsatzes.
Die Aufbereitung beinhaltet Misch-, Knet- und Homogenisierungsvorgänge sowie gegebenenfalls die Granulierung und Tablettierung. Darüber hinaus werden bei der Aufbereitung die für den Verarbeitungsprozeß störenden niedermolekularen Komponenten aus der Polymerformmasse entfernt.
Der *Mischvorgang* soll die Teilchen eines Stoffes abwechselnd zwischen die eines anderen verteilen, wobei mit fortschreitender Dauer des Vorgangs das für die Gesamtmasse vorgegebene

Mengenverhältnis der Komponenten in immer kleineren Volumeneinheiten verwirklicht wird. Der Mischvorgang kann in fester Phase bei körnigen Substanzen erfolgen oder in zähplastischer Phase unter Verwendung von festen und flüssigen Mischungskomponenten bzw. unter Energiezufuhr. Bei Plastizierung der Ausgangsstoffe verläuft der Mischvorgang unter Einwirkung stärkerer mechanischer Kräfte (Knetprozeß). In allen Fällen wird die Erzielung eines homogenen Gemischs angestrebt.

Bei thermoplastischen Formmassen stellt man durch Mischvorgänge im wesentlichen *Granulate* oder *Pasten* her. Für duroplastische Formmassen ist vielfach die Erzeugung von *Tabletten* kennzeichnend.

Hinsichtlich der Durchführung der Aufbereitungsvorgänge sind gewisse Besonderheiten im Verhalten der Plastwerkstoffe zu berücksichtigen. Das betrifft besonders die begrenzte thermische und chemische Stabilität, das geringe Wärmeleitvermögen und das Fließverhalten der Polymerformmassen. Daher werden an die zum Einsatz kommenden Aufbereitungsmaschinen

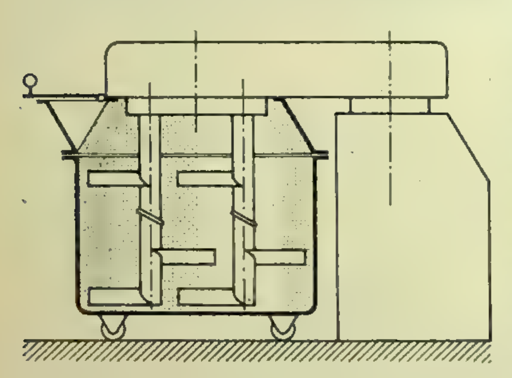


Abb. 5.1.2-1 *Trogmischer mit Planetenrührwerk*

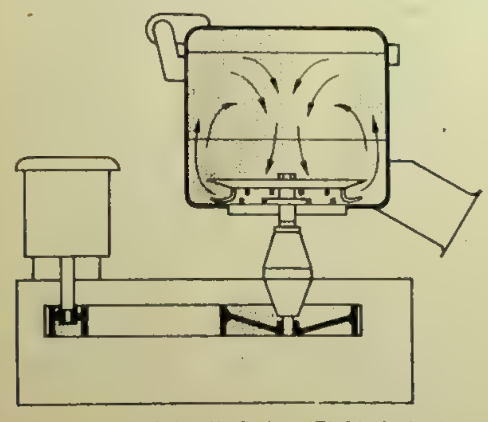


Abb. 5.1.2-2 *Schnellmischer (Fluidmischer)*

folgende Anforderungen im Hinblick auf eine optimale Prozeßführung gestellt:
– kurze Verweilzeit und damit geringe thermische Beanspruchung der Formmasse,
– intensive Misch- bzw. Knetwirkung,
– möglichst exakte Temperaturführung in den Mischaggregaten.

Die üblicherweise verwendeten Aufbereitungsanlagen lassen sich unterteilen in Maschinen mit diskontinuierlichem und kontinuierlichem Prozeßablauf. In beiden Maschinengruppen gibt es Aggregate, in denen der Aufbereitungsvorgang entweder bei Normaltemperatur oder bei erhöhter Temperatur unter Plastizierung der Formmasse durchgeführt werden kann. *Rührwerke, Freifallmischer, Trogmischer* (Abb. 5.1.2-1), *Schnellmischer* (Abb. 5.1.2-2) und z. T. auch Walzwerke arbeiten diskontinuierlich. Zu den kontinuierlich arbeitenden Maschinen zählen die *Durchflußmischer* sowie die *Schneckenpressen* oder *Extruder* (vgl. Abb. 5.2.4-3). Unter den Schneckenmaschinen sind besonders die *Doppelschnecken-* (Tafel 19) oder *Mehrschneckenextruder* erwähnenswert. Die vorgenannten Aufbereitungsaggregate haben unter unterschiedlichen technologischen Bedingungen eine Vielzahl von Aufbereitungsaufgaben in der plastverarbeitenden Industrie zu erfüllen.

Für die Wiederaufbereitung von Plastabfällen stehen ebenfalls eine Vielzahl geeigneter *Zerkleinerungsmaschinen* (*Schlag-* und *Schneidmühlen*) zur Verfügung, deren Einsatz im Interesse der Materialökonomie zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung ist.

Urformen. Ähnlich wie bei den Fertigungsverfahren der metallverarbeitenden Industrie gibt es auch in der Plasttechnologie eine Reihe von Verarbeitungsvarianten, die man als Urformverfahren bezeichnen kann (vgl. 8.1.). Die Plastwerkstoffe sind aufgrund ihrer Makromolekülstruktur in einem Zustand plastischer Fließbarkeit urformbar. Im Ergebnis der Urformverfahren erhält man sowohl aus den Thermoplasten als auch aus den Duroplasten entweder Halbzeuge oder Formteile.

Herstellung von Halbzeugen aus Thermoplasten. *Extrudieren.* Der größte Teil der Thermoplasthalbzeuge wird unter Verwendung von *Schneckenpressen* oder *Extrudern* (vgl. Abb. 5.2.4-3) hergestellt. Die Kombination eines Grundtyps dieser Maschinen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Formwerkzeuge gestattet die Erzeugung verschiedenster Halbzeuge mit variablem geometrischem Querschnitt (Abb. 5.1.2-3). Zur Extrusion eignen sich besonders Thermoplaste, wie Polyäthylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid, Polyamid, Zelluloseester, Polyäthylenterephthalat usw.

Für den Extrusionsprozeß wird die ausgewählte Plastformmasse als Pulver oder Granulat eingesetzt und unter dem Einfluß von thermischer bzw. mechanischer Energie unter Rotations-

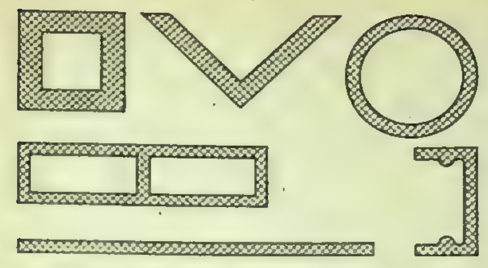


Abb. 5.1.2-3 *Beispiele für Extrudatquerschnitte*

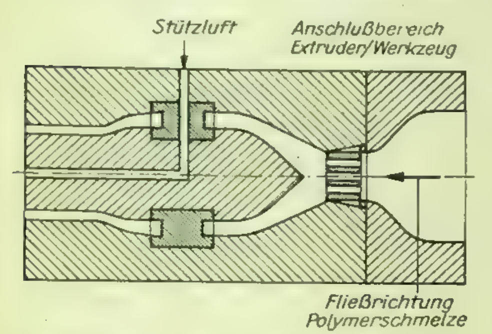


Abb. 5.1.2-4 *Extrusionswerkzeug für Hohlprofile*

bewegung der Förderschnecke des Extruders in einem Zylinder geschmolzen (plastiziert). Die Polymerschmelze wird unter Druck durch das formgebende Werkzeug gepreßt und unter Abkühlung bei gleichzeitiger Fixierung des geforderten Profilquerschnitts mit Hilfe einer geeigneten Abzugsvorrichtung abgeführt. Die aus der Düse austretende Polymerschmelze erhält ihre endgültige Gestalt während des Abkühlvorgangs entweder durch die bei einer bestimmten Abzugsgeschwindigkeit wirkende Abzugskraft (vornehmlich bei Vollprofilen), durch eine Kalibriereinrichtung oder durch nachträgliches Aufblasen. Je nach der konstruktiven Gestaltung der Extrusionswerkzeuge erfolgt der Prozeßablauf an Extrusionsanlagen in horizontaler oder vertikaler Richtung (im letzteren Fall werden Umlenkwerkzeuge eingesetzt). Bei Einbau eines sog. Dorns in das Werkzeug (Abb. 5.1.2-4) erhält man ein Hohlprofil.

Zur Herstellung von *Blasfolie* wird die Polymerschmelze aus einer Ringdüse extrudiert und der Folienschlauch in entsprechender Entfernung von der Düse abgequetscht (Tafel 18). Ein Luftpolster mit konstantem Druck verformt den noch thermoplastischen bis -elastischen Plastwerkstoff zu einem Folienschlauch mit einer bestimmten Wanddicke (Abb. 5.1.2-5). Durch Variation der Abzugsgeschwindigkeit ist darüber hinaus eine Verformung in Längsrichtung möglich. Zur Fertigung von *Kabelummantelungen* wird in das Extrusionswerkzeug zusätzlich seitlich der zu isolierende metallische Leiter eingeführt, der durch die Plastschmelze kontinuierlich umhüllt wird.

Kalandrieren wird zum Auswalzen von Thermoplasten zu *Folien* und *Platten* angewendet (Tafel 19). In diesem Fall wird der Plastwerkstoff auf Walzwerken mit 4 bis 5 beheizten Stahlwalzen plastiziert und anschließend über ein Kühlwalzensystem verfestigt. Dieses Fertigungsprinzip eignet sich besonders für die Verarbeitung von Polyvinylchlorid mit oder ohne Weichmacher.

Aus löslichen Polymerwerkstoffen lassen sich Folien bzw. Filme durch Auftragen der Polymerlösungen auf eine geeignete Unterlage (Stahlband, Stahlwalze: Abb. 5.1.2-6) und anschließendes Verdampfen des Lösungsmittels gewinnen. Derartige Gießtechnologien führen zu Halbzeugen hoher Maßgenauigkeit und wurden jahrzehntelang vorrangig für die Herstellung von Filmen auf Zellulosederivatbasis genutzt.

Anstelle von Lösungen ist auch die Verarbeitung von Dispersionen bzw. Pasten auf Stahlbandanlagen möglich. Diese technologische Variante

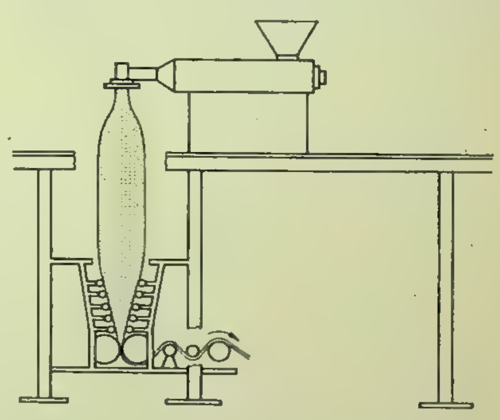


Abb. 5.1.2-5 *Blasfolienanlage*

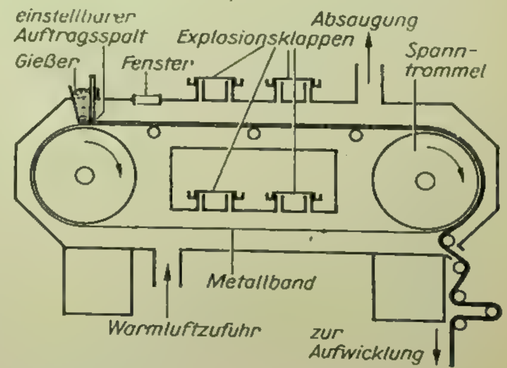


Abb. 5.1.2-6 *Foliengießanlage (Stahlbandprinzip)*

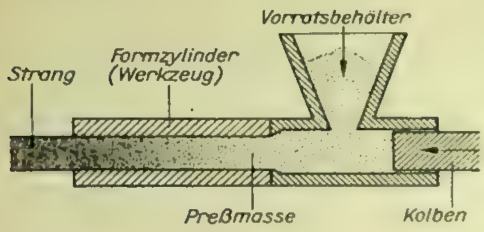


Abb. 5.1.2-7 *Strangpreßverfahren*

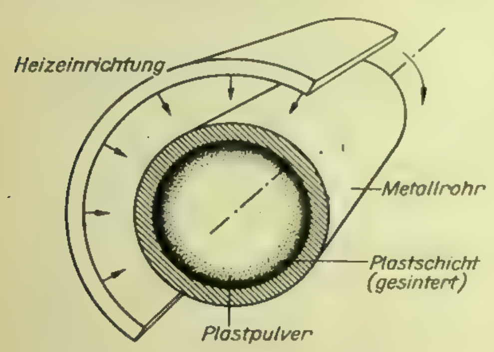


Abb. 5.1.2-8 *Schleudergießverfahren*

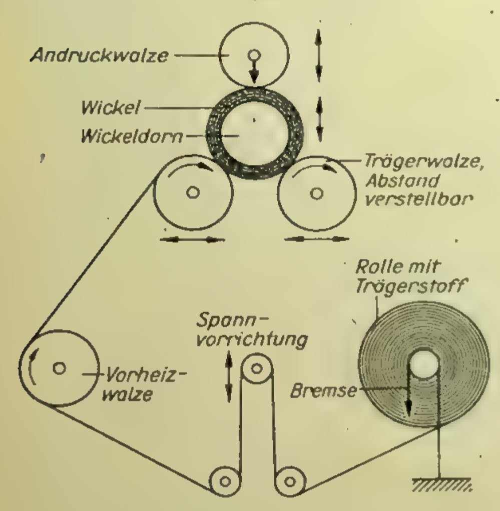


Abb. 5.1.2-9 *Wickelverfahren für Rohre*

dient u. a. zur Fertigung kompakter oder geschäumter Polymerschichten in der Kunstlederindustrie.

Pressen. Halbzeuge, wie z. B. Platten mit einer Dicke > 1 mm, können aus thermoplastischen Werkstoffen ferner durch Preßverfahren gewonnen werden, wofür als Ausgangsprodukte Pulver, Granulat oder Folien einsetzbar sind.

Beschichten. Unter den Flachformstoffen haben Verbundsysteme eine große Bedeutung, die durch *Kaschierung* geeigneter Thermoplaste mit anderen Werkstoffen, wie Papier, Textilien, Metallfolien usw., entstehen. Neben der Möglichkeit, solche Werkstoffverbunde durch Extrusion, Kalandrieren oder Gießen zu fertigen, spielen die Beschichtungstechnologien im *Streichverfahren* eine große Rolle. Dabei werden auf Flachformstoffe Pasten oder Dispersionen mit Hilfe sog. *Streichrakel* kontinuierlich aufgetragen. Darüber hinaus gestatten Walzenschmelzanlagen (vgl. Abb. 20.2.4-2) die Beschichtung von Flachformstoffen mit thermoplastischen Schmelzen. Derartige Verbundwerkstoffe zeichnen sich durch günstige Kombinationen der Eigenschaften der beteiligten Komponenten aus.

Herstellung von Halbzeugen aus Duroplasten. *Pressen.* Duroplasthalbzeuge werden vornehmlich im *Warmpreßverfahren* (Tafeln, Blöcke) oder im *Strangpreßverfahren* (Profile; Abb. 5.1.2-7) gefertigt. Werkstoffe dieser Technologien sind überwiegend Pheno- und Aminoplaste als rieselfähige Preßmasse mit Füllstoffanteil.

Gießen. In Gießtechnologien werden flüssige reaktionsfähige Ausgangskomponenten, wie ungesättigte Polyester- und Epoxidharze, eingesetzt. Rohre werden dabei im *Schleuderguß* (Abb. 5.1.2-8) und Schaumstoffbahnen oder -blöcke auf Basis vernetzter Polyurethane in einem kontinuierlichen Gießverfahren hergestellt. Rohre größerer Abmessungen aus Duroplasten können auch im sog. *Wickelverfahren* (Abb. 5.1.2-9) hergestellt werden.

Ziehen. Stäbe, Profile oder Rohre aus Polyester bzw. Epoxidharzen mit Verstärkungsmaterialien werden im *Profilziehverfahren* produziert (vgl. 8.2.3.). *Werkstoffkombinationen* von Duroplasten z. B. mit Glas- oder Kohlenstofffasern ergeben Werkstoffe mit guten mechanischen Eigenschaften. Durch Laminiertechnik können Flachformstoffe, wie Vliese, Gewebe, Papier u. a., mit Duroplasten z. B. zu Schichtpreßstoffen zusammengefügt werden.

Herstellung von Formteilen aus Thermoplasten. Zur Fertigung von Formteilen werden Thermoplaste als Flüssigkeiten (Lösungen, Dispersionen, Monomere), Pasten, Pulver und Granulate eingesetzt. Die Formung dieser Ausgangsstoffe in entsprechenden Formwerkzeugen kann bei Normal- oder erhöhter Temperatur drucklos oder unter Druck erfolgen. Die entstehenden Formteile weisen je nach Technologie eine kompakte oder geschäumte Werkstoffstruktur auf und sind als homogene Fest- und Hohlkörper herstellbar. Von besonderer Bedeutung sind Fertigungsverfahren, bei denen die Formmassen im Bereich plastischer Fließbarkeit zyklisch in allseitig geschlossene Formen unter Druck eingebracht und durch Abkühlung verfestigt werden.

Beim *Pressen* wird die pulverförmige bzw. körnige Formmasse in ein erwärmtes Preßwerkzeug dosiert. Infolge des Preßdrucks füllt die plasti-

sche Masse den Formhohlraum aus. Nach Abkühlung kann ein abbildungsgetreues Formteil entnommen werden.

Spritzgießen. Die thermoplastische Formmasse wird hierbei in einem Heizzylinder plastiziert und mit Hilfe eines Kolbens (Schneckenkolben) durch Fließkanäle in den Hohlraum eines Werkzeugs gespritzt (vgl. Abb. 5.2.4-2, Tafel 18). Nach Abkühlung läßt sich das Spritzgußteil bei Werkzeugöffnung entnehmen. Die vorgegebene Temperatur des Werkzeugs ist u. a. vom Polymerwerkstoff abhängig.

Bei einem Spritzzyklus können je nach Werkzeuggestaltung ein oder mehrere Formteile entstehen. Das Spritzgießverfahren zeichnet sich durch eine hohe Produktivität aus. Die Qualität der Spritzgußteile wird beeinflußt durch die Qualität der Werkzeugkontur, die Fließweggeometrien, die Fließeigenschaften der Plastformmassen und die Einhaltung optimaler Verarbeitungsparameter (Konstanz der Verarbeitungstemperatur, des Drucks und der Zykluszeit). Als Werkstoffe werden niedrigviskose Thermoplaste auf der Basis von Polystyrol, -äthylen, -propylen, -amid, -vinylchlorid, -urethan, -methylmethakrylat, -karbonat, -formaldehyd, Zelluloseester usw. eingesetzt. Diese Formmassen können in ungemischtem Zustand oder in Verbindung mit Füllstoffen verarbeitet werden.

Hohlkörperfertigung. Beim *Extrusionsblasen* wird ein durch Extrusion erzeugter Schlauch im thermoelastischen bis -plastischen Bereich durch ein sich schließendes Werkzeug abgequetscht und durch Druckluft oder ein flüssiges Medium unter Aufweitung an die kalte Werkzeugkontur angepreßt (Abb. 5.1.2-10). Die Entformung erfolgt nach Abkühlung durch Öffnen des Werkzeugs. Beim *Spritzblasen* wird ein sog. *Vorformling* auf einer Spritzgießmaschine in einem eingeschlossenen Werkzeug gespritzt und nachfolgend in einem Blaswerkzeug durch Druckluft zum Hohlkörper geformt (Abb. 5.1.2-11). Diese Methode wird vornehmlich für kleine Hohlkörper angewandt, während das Extrusionsblasen die Fertigung von Hohlkörpern mit einem Volumen > 100 ℓ gestattet.

Gieß- oder *Tauchverfahren* werden bei Lösungen, Dispersionen oder Pasten von Polymerwerkstoffen eingesetzt. Bei der *Gießtechnologie* wird die Formmasse in eine Negativform gegossen. Pasten sind dafür besonders geeignet. An der beheizten Formwandung wird der Plastwerkstoff ausgefällt oder angeschmolzen. Anschließend gießt man das überschüssige Material aus der Form aus. Beim nachträglichen Ausheizen bildet der verbliebene Polymerrest an der Formwand eine homogene Schicht. Entfernt man den überschüssigen Rest nicht aus der Form, so erhält man nach dieser Technologie ein kompaktes Formteil. Bei der *Tauchtechnologie* wird eine Positivform in die Plastlösung oder -dispersion getaucht, wodurch auf der Formoberfläche nach Verdampfen des Lösungsmittels eine dünne Schicht verbleibt, die nach Trennung von der Form den Hohlkörper bildet.

Weitere Technologien zur Fertigung von Hohlkörpern sind das *Rotationsformen* und das *Schleudergießen* (vgl. 3.5.2.). Dafür eignen sich Thermoplastpulver, -granulate bzw. -pasten, die durch ein- oder mehrachsige Rotation der Form an die beheizte Formwandung geschleudert werden und sich dort nach Abkühlung verfestigen.

Herstellung von Formteilen aus Duroplasten. Die Formteilfertigung aus Duroplasten erfolgt vorrangig durch Pressen (Abb. 5.1.2-12). Beim *Formpreßverfahren* wird die Duroplastpreßmasse in einem aus Gesenk und Stempel be-

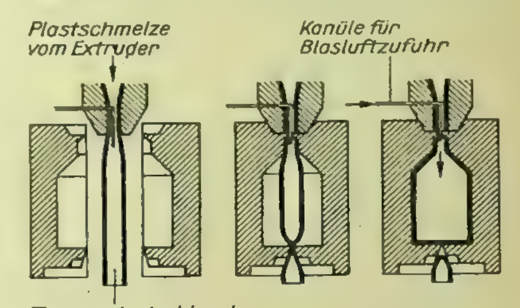


Abb. 5.1.2-10 *Extrusionsblasverfahren zur Hohlkörperfertigung*

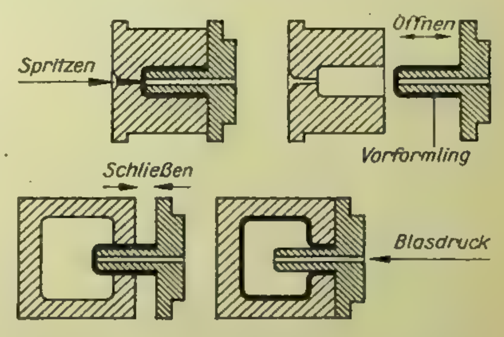


Abb. 5.1.2-11 *Spritzblasverfahren zur Hohlkörperfertigung*

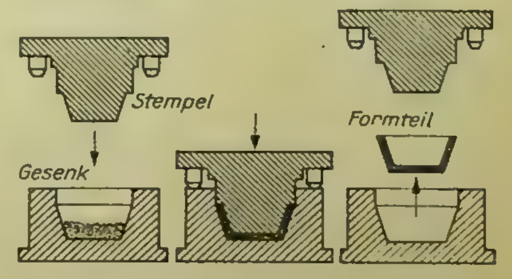


Abb. 5.1.2-12 *Preßverfahren*

stehenden Werkzeug unter Druck und Wärmeeinwirkung plastisch erweicht (Tafel 36). Nachdem der im beheizten Werkzeughohlraum ablaufende Härtungsverlauf im Polymerwerkstoff abgeschlossen ist, kann das Formteil entnommen werden. Beim *Spritzpressen (Transferpressen)* wird die Formmasse vor dem Preßvorgang in einer Druckkammer unter Wärme und Druck plastiziert und anschließend unter Druck durch Fließkanäle in den Hohlraum eines geschlossenen Werkzeugs gepreßt. Nach Abschluß des Härtungsvorgangs ist das Formteil entformbar.

Neben den Preßverfahren hat die Spritzgießtechnologie auch für die Duroplastverarbeitung – nicht zuletzt aus Produktivitätsgründen – zunehmende Bedeutung erlangt. Der Verfahrensablauf unterscheidet sich von der Thermoplastverarbeitung im wesentlichen dadurch, daß die Formteilbildung in einem beheizten Werkzeug abläuft und erst nach Beendigung einer chemischen Reaktion (Härtung, Vernetzung) der Festkörper entformt werden kann. Für verschiedene Duroplaste, wie härtbare Polyester, Epoxidharze, eignen sich noch einige andere Technologien zur Formteilfertigung. So können flüssige Ausgangskomponenten drucklos in ein Negativwerkzeug gegossen und durch nachfolgende Vernetzung zu einem Formteil verfestigt werden (*Gießverfahren*). Der Härtungsvorgang kann je nach Ausgangsrezeptur bei normaler oder erhöhter Temperatur ablaufen (sog. *Kalt-* bzw. *Heißhärtung*).

Beim *Faserharzspritzverfahren* wird ein Harzgemisch gemeinsam mit faserartigen Füllstoffen, z. B. Kurzglasfaser, in einer Mehrkomponenten-Spritzeinrichtung auf eine Werkzeugkontur aufgetragen. Nach Verdichtung und Aushärtung liegt das fertige Formteil vor. Die Verwendung von Positiv- oder Negativformen ist möglich.

Aufgrund der vernetzten Makromolekülstruktur zeichnen sich die Duroplaste durch gute thermische Stabilität, günstige Wärmeformbeständigkeit und weitgehend temperaturunabhängige mechanische Eigenschaften aus, so daß eine spanende Fertigung von Formteilen aus duroplastischen Halbzeugen möglich ist. Da bei der spanabhebenden Formung jedoch wesentliche Teile der homogenen, verdichteten Halbzeugoberfläche (sog. Preßhaut) abgetragen werden, können die erhaltenen Formteile im Anwendungsfall gegenüber verschiedenen Medien erhebliche Quellungseffekte und dadurch bedingte Maßänderungen aufweisen. Bei Beachtung dieser möglichen Erscheinungen sind jedoch eine Vielzahl technischer Einsatzmöglichkeiten gegeben, z. B. Lagerschalen, -buchsen usw.

Sonderverfahren. Durch Beschichtung von Metalloberflächen unter Verwendung pulverförmiger Thermoplaste von 40 bis 300 μm Korndurchmesser ist die Herstellung von Halbzeugen und Formteilen aus Werkstoffkombinationen mit günstigen anwendungstechnischen Eigenschaften möglich.

Beim *Wirbelsintern* wird das pulverisierte Polymer in einem Behälter durch Luft oder Stickstoff aufgewirbelt und der auf 200 bis 400 °C vorgewärmte Metallgegenstand in das Wirbelbett eingetaucht, wodurch es zu einem Sintervorgang der Plastteilchen auf der Metalloberfläche kommt. Die Beschichtung läßt sich anschließend durch eine zusätzliche Erwärmung homogenisieren bzw. bei Einsatz von Duroplasten aushärten.

Flammspritzen eignet sich zur Erzeugung von Plastüberzügen auf metallischen Flachformstoffen (Bleche) und Metallteilen unterschiedlicher Geometrie (Behälterauskleidungen usw.). In diesem Fall wird das Thermoplastpulver unter Druck durch eine Düse gesprüht, dabei in einer reduzierenden Gebläseflamme angeschmolzen und anschließend unter Abkühlung auf der zu schützenden Metalloberfläche abgeschieden.

Elektrostatisches Beschichten. Hierbei werden die pulverisierten Polymerteilchen nach Passieren einer Druckluftsprühpistole in einem Hochspannungsfeld (50 bis 90 kV) elektrisch aufgeladen und auf der geerdeten Metalloberfläche niedergeschlagen. Unter nachfolgender Erwärmung erfolgt die endgültige Schichtbildung, bei Thermoplasten lediglich durch einen Schmelzvorgang, bei Duroplasten durch gleichzeitige Härtung (Vernetzung der Makromoleküle). Die Qualität der Beschichtung ist von der Kornstruktur, den thermischen Eigenschaften und dem Fließverhalten des eingesetzten Plastwerkstoffs sowie von der Wahl und Einhaltung der Verarbeitungsparameter abhängig. Die Haftfestigkeit des Beschichtungsmaterials läßt sich durch geeignete Vorbehandlung der Metalloberfläche positiv beeinflussen. Entfettung, Aufrauhung der Oberfläche durch Sandstrahlen und/oder Einsatz chemischer Haftvermittler sind je nach Beschichtungsdicke erforderlich.

Die genannten Verfahren bieten günstige Möglichkeiten für den Korrosionsschutz metallischer Oberflächen.

Umformverfahren. Unter den Plastwerkstoffen eignen sich die Thermoplaste für eine nachträgliche Formänderung bereits urgeformter Halbzeuge (Folien, Platten usw.) u. a. zur Erzeugung von Formteilen. Aufgrund der chemischen Struktur der Thermoplaste ist es möglich, die physikalischen Bindungskräfte zwischen den Makromolekülen durch Energiezufuhr (z. B. Wärmestrahlung) so zu lockern, daß im thermoplastischen Zustand unter Einwirkung verhältnismäßig geringer Kräfte eine gewünschte Deformation der Thermoplasthalbzeuge erreicht werden kann. Eine Übersicht über die verschiedenen Umformtechnologien zeigt die Abb. 5.1.2-13.

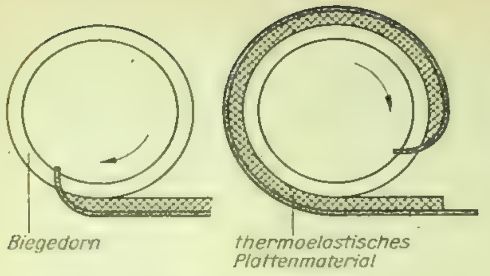


Abb. 5.1.2-14 *Biegeverfahren*

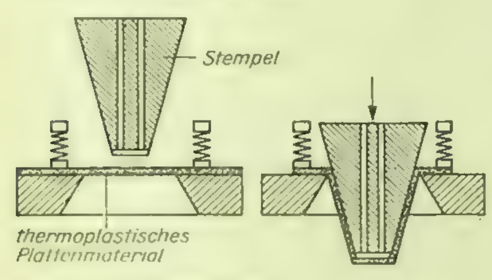


Abb. 5.1.2-15 *Ziehformen*

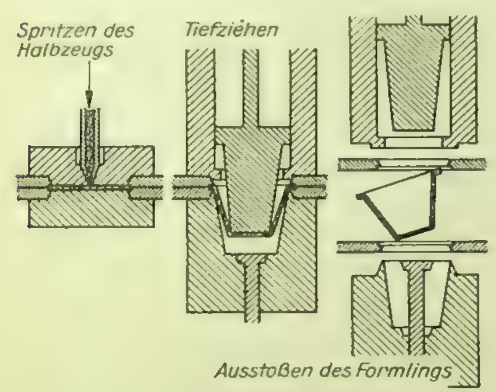


Abb. 5.1.2-16 *Spritzgieß-Tiefziehverfahren: 1 Spritzen des Halbzeugs, 2 Tiefziehen und 3 Ausstoßen des Formlings*

Biegen. Biegeverfahren werden zum Abkanten von Plattenmaterial oder zur Fertigung von Rohren aus Platten eingesetzt (Abb. 5.1.2-14). Auch das Biegen von Thermoplastrohren in der Installationstechnik zählt zu dieser Kategorie.

Streck- und Ziehformen. Streckformtechnologien eignen sich zur Fertigung von Verpackungen, Behältern, Verkleidungen usw. Obwohl die geometrische Genauigkeit der Teile geringer ist als beim Spritzgießen, können diese Methoden bei geringen Losgrößen aus ökonomischer Sicht mit dem Spritzgußverfahren konkurrieren. Die entsprechenden Plasthalbzeuge werden nach Überführung in den thermoelastischen Zustand mechanisch durch einen Stempel bzw. durch Gas- und Flüssigkeitsdruck oder Vakuum umgeformt. Auf eine Gegenform kann gegebenenfalls verzichtet werden. Vor der Verformung wird das Plattenmaterial fest eingespannt, wodurch im Verlauf des Umformvorgangs eine partielle Dickenänderung des Materials erfolgt. Zu den Ziehformtechnologien zählt das *Tiefziehen* (Abb. 5.1.2-15). Der Verfahrensablauf ist mit dem Streckformen vergleichbar, jedoch werden die umzuformenden Halbzeuge beim Deformationsvorgang in ihren Außenmaßen nicht festgehalten, so daß das Material in Deformationsrichtung nachgleiten kann, so daß kaum eine Änderung der Wanddicke eintritt.

Die Qualität der Umformteile wird durch die Vorwärmzeit und -temperatur des Ausgangsmaterials, durch die Umformtemperatur und -geschwindigkeit sowie durch die Werkzeugtemperatur und die Abkühlzeit nach der Verformung wesentlich beeinflußt. Auch eine zu starke Verformung des Plasthalbzeugs kann für die Formteilqualität von entscheidender Bedeutung sein. Durch die elastischen Eigenschaften der eingesetzten Thermoplastwerkstoffe kann es im Laufe der Zeit zu einer gewissen Rückverformung der Umformteile kommen. Dieses unerwünschte Rückstellvermögen läßt sich durch eine richtige Auswahl der Umformtemperatur,

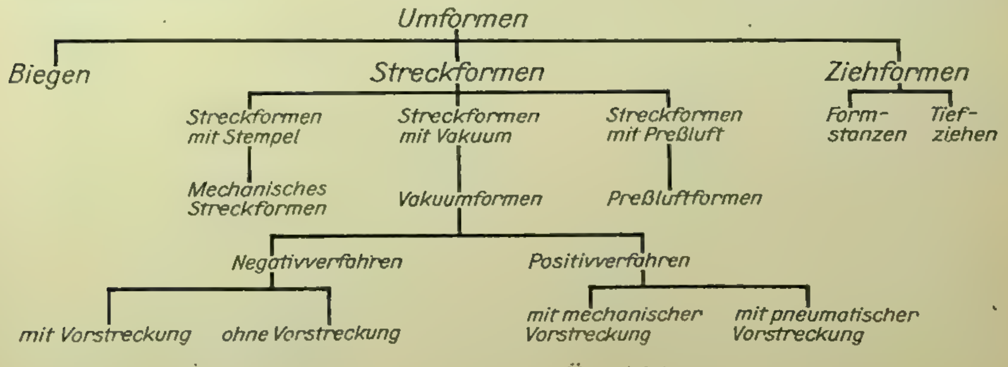


Abb. 5.1.2-13 *Umformtechnologien für Thermoplaste (Übersicht)*

der Werkzeugtemperatur und der Abkühlzeit vermindern.
Neben den Warmformtechnologien erlangt die *Kaltumformung* eine immer größere technische Bedeutung. Dabei werden Thermoplasthalbzeuge unter Normaltemperatur unter einem gegenüber den Warmformverfahren erhöhten Druck umgeformt. Diese Methoden unterliegen hinsichtlich ihrer Anwendung gewissen Begrenzungen, da nur Plattenmaterialien geringerer Dicke und Formteile ausgewählter geometrischer Gestalt derartigen Technologien zugänglich sind.
Auch die Kombination verschiedener Grundverfahren gestattet die rationelle Fertigung von Formteilen. So hat sich die aufeinanderfolgende Verwendung von Urform- und Umformtechnologien beim Spritzgießblasen und Spritzgießtiefziehen (Abb. 5.1.2-16) bewährt.
Fügeverfahren. Für die Plastwerkstoffe haben die Klebe- und die Schweißtechnik (für Thermoplaste) große Bedeutung, während Verfahren, wie Schrauben, Nieten usw. zwar möglich, aber nicht empfehlenswert sind.
Kleben. In der Klebtechnik erfolgt die Verbindung von Festkörpern durch Oberflächenhaftung mit Hilfe geeigneter Klebstoffe. Die Klebtechnik ist bei systematischer Auswahl geeigneter Klebstoffe nahezu universell anwendbar. Es stehen lösungsmittelhaltige Klebstoffe und in Form der Reaktionsklebstoffe weitgehend lösungsmittelfreie Systeme für die Erzeugung haltbarer Verbunde zur Verfügung. Die Festigkeit einer Klebverbindung wird wesentlich durch die Art der zu verbindenden Werkstoffe, die Zusammensetzung des Klebstoffs, die Eigenspannungen in der Klebfuge, die Oberflächenstruktur der Klebstelle (u. a. abhängig von der Oberflächenvorbehandlung) sowie die Klebstoffdicke beeinflußt. Die auf eine Klebverbindung übertragbare Kraft läßt sich als Produkt aus der Klebfläche und der wirkenden Schubspannung bestimmen: $F = A \cdot \tau$.
Eine einwandfreie Klebtechnologie bedingt eine klebgerechte Gestaltung der Trennebenen der zu fügenden Werkstoffe. Für die notwendige Vor-

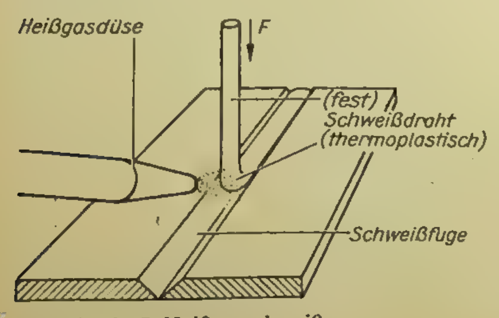


***Abb. 5.1.2-17** Heißgasschweißen*

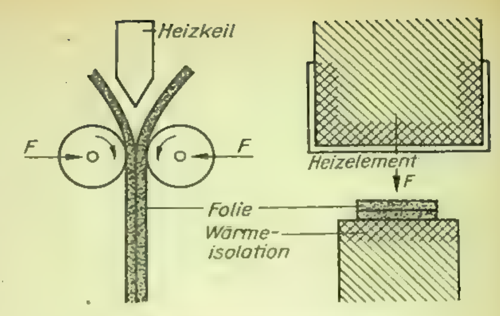


***Abb. 5.1.2-18** Heizelementschweißen*

behandlung der Kontaktflächen der zu fügenden Werkstoffe sind eine Reihe von Maßnahmen zu beachten, um optimale mechanische Eigenschaften der Fügestellen gewährleisten zu können (z. B. Entfetten, Sandstrahlen, chemische Oxydation usw.). Im Hinblick auf die anwendungstechnischen Verhaltensweisen derartiger Fügestellen ist zu beachten, daß Temperatur, Luftfeuchtigkeit und zeitabhängige Alterungserscheinungen sich gegebenenfalls festigkeitsmindernd auf die Klebverbindungen auswirken können.
Schweißen. Der Fügevorgang verläuft hierbei unter Anwendung von Wärme und Druck, wobei mit oder ohne Zusatzwerkstoff gearbeitet werden kann. Es sind manuelle, in zunehmendem Maße aber mechanisierte Schweißverfahren üblich. Die verschiedenen Schweißtechnologien für Thermoplaste lassen sich hinsichtlich der Art der Wärmeenergiezufuhr zur Verbindungsstelle klassifizieren. Für dicke Folien, Platten, Profile und Rohre eignet sich das *Heißgasschweißen* (Abb. 5.1.2-17), das unter Verwendung eines Zusatzmaterials (Schweißdraht aus dem gleichen Material wie die zu fügenden Plastteile) durchgeführt wird. Schweißfugen und -draht müssen frei von Schmutz und Fettresten sein. Die Heißgastemperaturen liegen zwischen 250 bis 300°C, wodurch das Material des Schweißstabs plastiziert und dabei unter ständigem mechanischem Druck geschweißt wird.
Beim *Heizelementschweißen* (Abb. 5.1.2-18) werden die Fügeteile durch Kontakt mit den Heizelementen direkt erwärmt und anschließend unter Druck ohne Zusatzwerkstoff zusammengefügt. Hierzu zählen das *Heizkeilschweißen*, das *Wärmeimpulsschweißen* und das *Preßstumpfschweißen*. Die erforderlichen Temperaturen liegen in Abhängigkeit von den zu fügenden Werkstoffen zwischen 180 bis 300°C. Für Plastwerkstoffe mit einem ausreichenden dielektrischen Verlustfaktor können *Hochfrequenzschweißverfahren* angewendet werden. Die Erwärmung der zu verbindenden Flächen erfolgt bei gleichzeitiger Berührung in einem Kondensatorfeld einer Hochfrequenzspannungsquelle. Die notwendige Schweißtemperatur wird durch die auf diese Weise angeregten Molekül-

bewegungen im Plastwerkstoff erzeugt. Der eigentliche Fügevorgang erfolgt unter Druck mit oder ohne Zusatzwerkstoff. Die HF-Schweißverfahren eignen sich besonders für diskontinuierliche Formschweißungen. Auch das *Ultraschallschweißen* und im geringen Maße das *Reibungsschweißen* werden zum Fügen von Plastteilen eingesetzt.

Trennverfahren. Plasthalbzeuge oder -formteile werden i. allg. durch Ur- oder Umformprozesse so hergestellt, daß keine oder nur eine geringfügige Nachbearbeitung notwendig ist. Eine spanende Bearbeitung von Plastteilen ist deshalb in der Regel auf die Herstellung niedriger Stückzahlen, Fertigungsmuster und Sonderanwendungsfälle beschränkt. Die erforderlichen Schnittkräfte sind geringer als bei der spanenden Metallverarbeitung. Nachteilig wirken sich bei der spanenden Fertigung von Plastteilen gewisse physikalische und fertigungstechnische Eigenschaften der Plastwerkstoffe aus. So führt z. B. die physikalische Struktur der Plastwerkstoffe zu einer schlechten Spanbildung und geringe Wärmeleitfähigkeit zu einer ungenügenden Wärmeabfuhr und damit, z. B. bei Thermoplasten, zu Schmelzerscheinungen an der Trennfläche. Nachfolgende Relaxationserscheinungen können im Anwendungsfall zu gewissen Maßänderungen derartiger Plastteile führen.

Als wichtige technologische Parameter sind hohe Arbeitsgeschwindigkeiten bei geringem Vorschub, die Auswahl günstiger Kühlmedien sowie hartmetallbestückte Werkzeuge mit plasttypischen Schneidenwinkeln hervorzuheben. Die gegenüber Metallen wesentlich größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten der Plastwerkstoffe müssen besonders hinsichtlich der Maßhaltigkeit von Bohrungen berücksichtigt werden.

Schneiden kann zur Trennung von Thermoplast- oder Duroplastplatten bis zu einer Dicke von ≈ 3 mm eingesetzt werden. Die Schneidengeometrien der erforderlichen *Schlagschere* unterscheiden sich wesentlich von denen der Blechscheren. Einwandfreie Schnittflächen erhält man vielfach erst durch Vorwärmung der Plasthalbzeuge. Die erforderliche Vorwärmtemperatur und -zeit sind werkstoff- und dickenabhängig. In bestimmten Fällen ist die Trennung von Plasthalbzeugen durch Bruch an einer vorgeritzten Trennlinie möglich. Bei dekorativen Schichtpreßstoffen bietet sich diese Trennmethode deswegen an, weil dadurch eine unregelmäßige Bruchkante der verhältnismäßig spröden Halbzeugoberfläche weitgehend vermieden werden kann.

Stanzen. Mit Stanzmessern oder Bandstahlschnitten können vorgegebene Konturen aus zähen Plastwerkstoffen ausgeschnitten werden. Ein typisches Beispiel für diese Methode ist die Herstellung von Zuschnitten aus synthetischen Werkstoffen in der Schuhindustrie (vgl. 20.4.). Bei Einsatz ausgewählter Schnittwerkzeuge, die denen der metallverarbeitenden weitgehend gleichen, ist die Serienfertigung von Stanzteilen aus Thermo- und Duroplasthalbzeugen möglich. Es eignet sich Plattenmaterial bis zu einer Schichtdicke von 4 mm. In Abhängigkeit vom Plastwerkstoff und von der Materialdicke kann auch in diesem Falle eine Vorwärmung des Halbzeugs erforderlich werden.

Verfahren zur Eigenschaftsänderung. Im allgemeinen wird angestrebt, durch Urformverfahren oder Umformtechnologien weitgehend nachbearbeitungsfreie Plastformteile bzw. -halbzeuge zu fertigen, d. h. die physikalische Struktur des Werkstoffgefüges so zu steuern, daß nachfolgend nur minimale Eigenschaftsänderungen zu erwarten sind.

Tempern. In Einzelfällen wird durch Tempern der Plastteile nach ihrer Herstellung eine stabilere Gefügestruktur und damit ein konstanteres Eigenschaftsbild erzeugt. Das trifft besonders für teilkristalline Thermoplaste zu, bei denen durch einen maximalen Kristallinitätsgrad die Gefahr weiterer Maßänderungen herabgesetzt wird. Der Tempervorgang geht einher mit dem Abbau von inneren Spannungen in den Plastteilen, was auch für amorphe Thermoplaste zutrifft. Der Tempervorgang kann je nach Werkstoff bei einer Temperatur bis 100 °C (bei Polyamid sogar bis 180 °C) und in einem Zeitraum bis zu 7 h erfolgen. Derartige Gefügeänderungen durch Erhöhung des Kristallisationsgrades oder Abbau der inneren Spannungen können sich außer auf die Maßstabilität auch auf das mechanische Eigenschaftsbild der Plastteile erheblich auswirken. Bei Duroplasterzeugnissen kann eine gezielte nachträgliche thermische Belastung zu einer Veränderung des Vernetzungsgrades im Polymerwerkstoff führen, wobei es bis zum optimalen Aushärtegrad zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, anschließend aber durch sog. *Überhärtung* zu einer Versprödung kommen kann.

Recken. Plasthalbzeuge (Monofile, Folien usw.) werden beim Recken durch ein- oder mehrachsige Spannungsbeanspruchungen bei Normaltemperatur oder nach Erwärmung um ein Vielfaches der ursprünglichen Abmessung gedehnt. Durch Umlagerung der Makromoleküle und „Einfrieren" von inneren Spannungen kommt es vielfach zu einer wesentlichen Erhöhung der mechanischen Festigkeit in der beim Reckvorgang gewählten Beanspruchungsrichtung. Diese Methoden sind von Bedeutung für die Herstellung mono- oder biaxialgereckter Folien sowie für die Fertigung hochfester Monofile in der Chemiefaserindustrie. Die Reckprozesse können als Nachbearbeitungsstufe durchgeführt oder mit Ur- bzw. Umformtechnologien gekoppelt werden.

Durch die *Einwirkung von energiereicher Strahlung* kann es bei gezieltem Einsatz zur Eigen-

schaftsverbesserung durch Vernetzung der Polymermoleküle kommen. Derartige Strahlungsvernetzungen sind bereits während der Formteil- und Halbzeugfertigung möglich (z. B. zur Härtung ungesättigter Polyester bei der Profil- oder Plattenfabrikation). Strahlungsvernetzungen können vor allem bei Polyolefin, -vinylchlorid, -ester, -amid, -styrol u. a. herbeigeführt werden. Polymethakrylate, -karbonat, -tetrafluoräthylen, Zellulosederivate u. a. neigen bei Strahlungseinwirkung zu einer Depolymerisation und damit zu einer Abbaureaktion der Polymermoleküle.

Metallisieren von Oberflächen. Verdampfte Metallatome können im Hochvakuum (bis etwa $1{,}33 \cdot 10^{-2}$ Pa) auf fettfreien Plastoberflächen in Schichten von 0,1 bis 1 μm abgeschieden werden. Neigen die Plastwerkstoffe unter den Vakuumbedingungen zur Abgabe niedermolekularer Verbindungen, muß erst eine Lackgrundierung aufgetragen werden. Für den Auftrag von dünnen Schichten hochschmelzender Metalle auf Plastformteilen eignet sich die *Katodenzerstäubung* in einem Spannungsfeld von 2 bis 5 kV und einem Druck von ≈ 10 Pa. Nachteilig ist, daß 30 bis 60 min erforderlich sind, um ausreichend reflektierende Schichten zu erhalten. Auch durch *chemische Reduktion von Metallsalzlösungen* können metallische Schichten auf Plastoberflächen abgeschieden werden. Diese Methode ist als eigenständiges Metallisierungsverfahren brauchbar oder dient der Schaffung einer leitfähigen Oberfläche auf Plastteilen, die anschließend durch *Galvanisieren* mit einem dickeren Metallüberzug versehen werden sollen. Die Haftfestigkeit galvanisch aufgetragener Metallschichten übertrifft die aller bisher genannten Verfahren. Der Verbund zwischen Plastoberfläche und Metallschicht ist in diesem Falle z. T. auf eine mechanische Verankerung zurückzuführen. Der Nachteil der Galvanisierung besteht in der Vielzahl notwendiger Verfahrensschritte, da das plastgerecht gestaltete Formteil möglichst spannungsfrei gefertigt werden muß, anschließend durch Beizen in einer oxydierenden Säure vorbehandelt und nach ausreichender Wässerung mit einer feinverteilten Edelmetallschicht aktiviert wird. Durch nachfolgende stromlose (reduktive) Kupferabscheidung erzeugt man eine homogene Oberfläche, auf die weitere metallische Schichten (z. B. Nickel) galvanisch aufgetragen werden können.

Beim *Sorptionsverfahren* werden nach Einführung funktioneller Gruppen in die Plastoberfläche Metallionen absorbiert und anschließend reduziert, die die Oberfläche für eine anschließende Metallabscheidung aktivieren. Danach erfolgt ein elektrolytischer Auftrag der endgültigen metallischen Deckschicht. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Möglichkeit der Herstellung partiell-metallisierter Teile, während bei allen bisher genannten Methoden im wesentlichen nur eine vollständige Metallisierung der Oberfläche möglich ist. Auch das Beschichten von Oberflächen mit metallpigmenthaltigem Lack, der im Streich- oder Druckverfahren aufgetragen wird, zählt zu den Metallisierungsverfahren. Bei größeren Flächen ist eine Kaschierung des Polymerwerkstoffs mit Metallfolien möglich (z. B. Zierprofile für Kraftfahrzeuge).

Bedrucken oder *Lackieren* ist zur Oberflächennachbehandlung von Plastformteilen weniger üblich. Derartige Verfahren werden zur Veredlung von Halbzeugoberflächen in größerem Maße genutzt (z. B. Dekor-, Glanzfolien). In diesen Fällen ändert sich nicht prinzipiell das Eigenschaftsbild, sondern es erfolgt im wesentlichen eine Änderung des Gebrauchswerts.

Für ausgewählte Anwendungsfälle hat sich die *elektrostatische Beflockung* der Oberflächen von Polymerwerkstoffen mit Stapelfasern (Schnittlänge 0,3 bis 12 mm) bewährt. Die elektrisch aufgeladenen Fasern werden in einem elektrischen Feld (70 kV, 0,3 mA) auf der mit einem Klebstoff versehenen Plastoberfläche abgeschieden. Wäßrige Dispersionen eignen sich in diesem Falle besonders gut als Klebstoffe, da dadurch die Erdung des Klebstoffilms begünstigt wird. Im Prinzip lassen sich alle Polymeroberflächen beflocken. Als Stapelfasermaterial eignen sich Baumwolle, Viskose, Polyamid u. a.

Verbundwerkstoffe. Die Kombination von Plastwerkstoffen mit pulverförmigen, körnigen oder fasrigen Mischungsbestandteilen anorganischer bzw. organischer Herkunft wird allgemein als *Füllstoffeinsatz* bezeichnet. Die Verwendung von Füllstoffen kann aus materialökonomischen Gründen erfolgen, oder es werden echte Eigenschaftsverbesserungen, z. B. durch Einsatz aktiver Füllstoffe, angestrebt. Die Einarbeitung der Füllstoffe erfolgt i. allg. durch Aufbereitung vor dem Urformprozeß. Lediglich bei Verwendung von flächenförmigen Füllstoffen (Gewirke, Vliese usw.) erfolgt die Zuführung zum Plastwerkstoff während der Urformung oder durch Fügeverfahren.

Verbundfolien verknüpfen ausgewählte Eigenschaften der Einzelkomponenten durch Kombination dieser Werkstoffe. So kann man die Festigkeit bestimmter Plastfolien mit der Undurchlässigkeit für Gas und Flüssigkeiten anderer Plastfolien günstig kombinieren oder z. B. den Glanz einer Metallfolie mit der Flexibilität einer Polymerfolie. Die Fertigung solcher Verbundfolien kann durch Beschichtung einer vorgefertigten Folie, durch Kaschierung zweier oder mehrerer vorgefertigter Folien oder auch durch gleichzeitige Extrusion unterschiedlicher Polymerschmelzen aus einer Düse erfolgen.

Ein Sonderfall der Verbundwerkstoffe ist die Kombination von kompakten und geschäumten Schichten aus den gleichen oder unterschiedlichen Plastwerkstoffen. Dabei wird i. allg. ein

zellartiges Volumen durch eine kompakte dichte Außenhaut umschlossen. Dieser sog. *Strukturschaum* zeichnet sich durch niedrigere Dichte und eine gegebenenfalls größere Formstabilität gegenüber einem Kompaktbauteil aus dem gleichen Plastwerkstoff aus. Zu den wichtigsten Verbundwerkstoffen zählen Werkstoffpaarungen aus Holz oder Metall mit kompaktem oder geschäumtem Polymerwerkstoff. Derartige *Sandwich-Elemente* sind durch eine geringe Dichte und durch ein ausgezeichnetes Wärme- bzw. Schallisolationsvermögen charakterisiert. Sie dienen im Fahrzeugbau und im Bauwesen als wichtige Konstruktionselemente.

5.1.3. Anwendungstechnik der Plaste

Werkstoffauswahl und Einsatzkriterien. Die Verarbeitungseigenschaften der Plaste und die u. a. damit zusammenhängenden hochproduktiven Verarbeitungsverfahren gestatten die Fertigung einer Vielzahl von Halbzeugen bzw. Formteilen unterschiedlichster geometrischer Gestalt. In Verbindung mit den jeweiligen physikalischen und chemischen Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Plastwerkstoffe ergeben sich umfangreiche Variationsmöglichkeiten für den Plasteinsatz auf den verschiedensten Anwendungsgebieten. Die anwendungstechnischen Forderungen bedingen eine plastgerechte Konstruktion des Erzeugnisses im Hinblick auf seine Funktionstüchtigkeit und Lebensdauer unter Berücksichtigung aller während der Anwendungsphase wirkenden Umwelteinflüsse. Aus den Einsatzbedingungen resultiert die Werkstoffauswahl. So können z. B. bei Plasteinsatz im Maschinenbau die mechanischen Eigenschaften der Polymerwerkstoffe als Einsatzkriterien im Vordergrund stehen, im Rohrleitungs- und Anlagenbau die chemischen Verhaltensweisen, in der Medizintechnik u. a. die physiologische Unbedenklichkeit usw. Umfassendere diesbezügliche Aussagen sind jedoch stets nur bei exakter Kenntnis der Beanspruchungsbedingungen der Plasterzeugnisse möglich (Tab. 5.1.3-1 bis

Tab. 5.1.3-1 *Plastwerkstoffeinsatz im Bauwesen*

Einsatzvariante	geeignete Plastwerkstoffe
Abdeckplanen	PVC, PE, PP
Abwasserleitungen	PVC, PE, PP, PF
Armaturen	PA, PVC, POM
Außenwandverkleidungen	PVC, GUP, PF
Badewannen	PMMA
Baubeschläge	POM
Bindemittel	PVAC, PVB, PVF
Bauprofile	PVC, GUP
beschichtete Bleche	PVC
Dachbeläge	PE, PIB, PVC, PE/Bitumen
Dachrinnen	PVC
Dampfsperren	PE, PVC
Dekorplatten	PVC, PF, UF, PUR
Dichtungsbahnen	PVC, PE, PE/Bitumen
Estriche	PVAC, PMMA, UP, PUR
Fensterrahmenprofile	PVC, PF, UF
Fittings	PVC, PE, PB, PC
Frischwasserleitungen	PVC, PE
Fugendichtungen	PVC, MMA/VC-Copolymere, PA, PETP
Fußbodenbeläge	PVC
Gasschläuche	PVC
Gewächshäuser	PE, PVC, PMMA
Handlaufprofile	PVC
Heißwasserleitungen	PE vernetzt, PP, ABS, PB
Innenwandverkleidungen	PVC, PUR, PS, UF
Kunstharz-Beton/Mörtel	UP, EP
Kunststein	PMMA
Leuchten	CAB, PMMA
Lichtkuppeln	CAB, PMMA, GUP
Lüftungsleitungen	PVC, PE, PP
Sandwich-Verbundelemente	PVC, PUR, UP
Sanitär-Installation	PS, PA, PE, PMMA, PVC
Schalldämmung	PS, PUR, UF (Zellstruktur)
Traglufthallen	PVC
Trennschichten	PE
Wärmeisolation	PS, PUR, UF (Zellstruktur

Tab. 5.1.3-2 *Plastwerkstoffeinsatz in der Elektrotechnik*

Einsatzvariante	geeignete Plastwerkstoffe
Akku-Kästen	PE, PP
Elektrofolien	PETP, CA, PS, PC, PI
Elektroisoliermassen	PVC, PE
Feuchtraumleitungen	PVC, PE
Gerätegehäuse	PE, PP, PS, ABS, PF
Hochfrequenztechnik	Polyfluorcarbone, PS
Isolatoren	PC, PMMA, Polybutadien
Kabelisolierungen	PVC, PE
Leuchtreklame	PMMA, GUP
Lichtleitkabel	PMMA
Schalterabdeckungen	PF, MF

Tab. 5.1.3-3 *Plastwerkstoffeinsatz im Maschinenbau*

Einsatzvariante	geeignete Plastwerkstoffe
Buchsen	Vf, PA, PF
Dichtungen	PUR, PTFE, Vf, PA
Druckschläuche	PA, POM
Druckwalzenbezüge	Vf
Gehäuse	GUP, PVC, PF, EP
Getriebeteile	PA, POM
Gleitlager	PA, PTFE, POM, PETP
Hydraulikleitungen	PA, PE
Kopierfräsmodelle	UP, EP, PUR
Kugellagerkäfige	PF, PA, EP
Kupplungselemente	PUR
Membranen	PUR
Modellbau	UP, EP, PUR, PS, PMMA
Pumpenteile	PUR, PVC
Verkleidungselemente	GUP, PVC, PS, ABS, PMMA, PC
Zahnräder	PA, PUR, Vf, PF, GFP, PE, POM, PETP
Ziehwerkzeuge	Vf, PF, UP, EP

5.1.3-6). Die aus der plastgerechten Konstruktion folgende Erzeugnisgestalt und die Werkstoffauswahl sind neben der gewünschten Fertigungslosgröße (Erzeugnismenge) bestimmend für die Festlegung der erforderlichen Technologie (Extrusion, Spritzgießverfahren usw.).

5.1.4. Probleme des Plastabfalls

Der umfangreiche Anfall fester Abprodukte aus den Bereichen der Verarbeitung und Anwendung hochpolymerer Werkstoffe (Abb. 5.1.4-1) fordert wirksame, volkswirtschaftlich akzeptable Lösungen zur
- Erfassung der Plastabfälle,
- Verwertung bzw. Beseitigung des Polymermülls,
- Wiederverwendung fester Abprodukte als Sekundärrohstoffe.

Tab. 5.1.3-4 *Plastwerkstoffeinsatz in der Medizintechnik*

Einsatzvariante	geeignete Plastwerkstoffe
Blutersatzmittel	Polyvinylpyrrolidon, Diäthylenglykolformal, Dextran
Bluttransfusionsgefäße	PVC, PE, PA
Dialyseeinrichtungen	PVC
Dentalmassen	PMMA
Haftklebstoffe	PIB, Polyvinyläther
Implantate	PMMA, PC
Medikamententräger	UF (Schaum)
Orthopädie	PMMA, PC
Prothesen	PMMA, PC
Salbengrundlagen	PVAL, UF, Cellulosederivate
Schläuche	PVC, PE, PA
Wundpuder	UF (Schaum), MF (Schaum)

Tab. 5.1.3-5 *Plastwerkstoffeinsatz in der Verpackungstechnik*

Einsatzvariante	geeignete Plastwerkstoffe
Becher	PVC, PS, MF, PE
Blisterpackungen	PE
Einweggeschirr	PS
Flaschen	PE, PVC, POM
Folien	PE, PP, PS, PVC, PA, PETP, PC, Zellglas, CA
Hohlkörper	PE, PVC, POM
Schrumpffolien	PE, PVB, PVC
Schrumpfkapseln	PVB
Skin-Packungen	PE
Tauchpackungen	PVC, VC/VAc-Copolymerisat
Transportbehälter	PE, SB, ABS, SAN, GUP
Verschlüsse	PE, PVC, MF
Verbundfolien	PE/PP; PA/PE; PETP/PE; PE/Zellglas; Zellglas/PVDC
wasserlösliche Folien	PVA

Tab. 5.1.3-6 *Plastwerkstoffeinsatz in der Verkehrstechnik*

Einsatzvariante	geeignete Plastwerkstoffe
Armaturenbretter	ABS, SB, PVC
Autolenkräder	CAB
Batteriegehäuse	SAN, SB
Boote	GUP
Bremsbeläge	PF
Bremsölbehälter	PE
Kabrioletfenster	PVC
Druckschläuche	PA, diverse Polyfluorcarbone
Entfrosterdüsen	PP
Flugzeugkanzeln	PMMA, PC
Griffe	CAB, PF, PE, POM
Karosseriebau	GUP, PF, ABS
Kolbenringe	Vf
Kraftstoffbehälter	PE, PA
Leichtbauteile	GUP, EP, PUR
Lüfterräder	PA
Nummernschilder	PVC
Polstermaterial	PVC, PUR
Schiffsschrauben	PA
Segelflugzeuge	GUP
Sicherheitsglas	PMMA, PVB
Signalleuchten	PMMA, PS, PC
Stoßstangen	PUR
Triebwerksteile	Polyfluorcarbone
Verkehrszeichen	CAB, PMMA
Zierelemente	ABS, PMMA, CAB

Unter „*Polymermüll*" sind alle Abfälle zu verstehen, die entweder während des Verarbeitungsprozesses oder im Verlauf der individuellen sowie der gesellschaftlichen Konsumtion ihren ursprünglichen Gebrauchswert vollkommen verloren haben und somit nicht unmittelbar wiederverwendet werden können.

Beseitigung des Polymermülls. Ausgehend von den Anforderungen des Umweltschutzes eignen sich verschiedene Methoden und Verfahren zur Beseitigung des Polymermülls (Abb. 5.1.4-2).

Deponie. Während man bei der *ungeordneten Deponie* die Abfälle im Anlieferungszustand

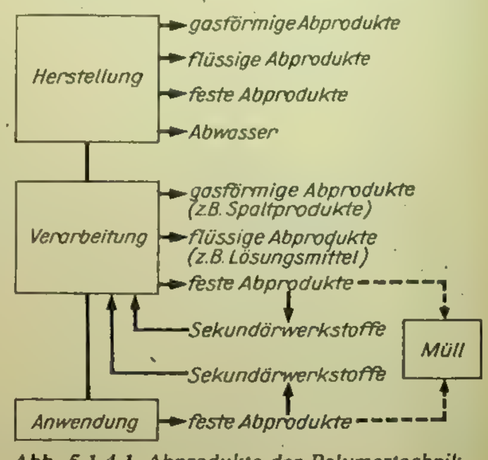


Abb. 5.1.4-1 Abprodukte der Polymertechnik

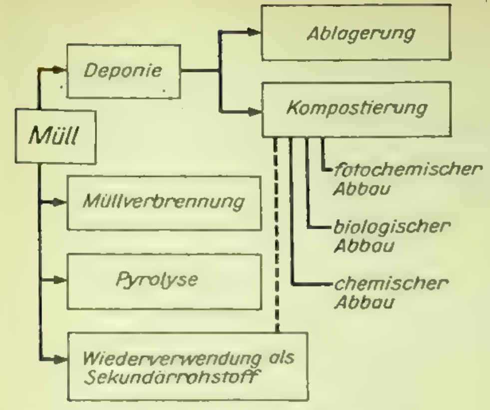


Abb. 5.1.4-2 Methoden zur Beseitigung des Polymermülls

ablagert, findet bei der *geordneten Deponie* vor der schichtenweisen Ablagerung (Müll/Sand bzw. Erdreich) i. allg. ein Verdichtungsprozeß statt, um die Wiedereingliederung in das natürliche Landschaftsbild zu begünstigen. Als Sonderfall der geordneten Deponie kann die *Kompostierung* angesehen werden, bei der der Verrottungsvorgang der Polymerabfälle mit einem gezielten fotochemischen, biologischen bzw. chemischen Abbau gekoppelt sein kann. Verschiedene „gesteuerte" Abbaumethoden bieten weitere Möglichkeiten zur Beseitigung des Plastabfalls. So lassen sich durch den Zusatz geeigneter Aktivierungssysteme sowohl der *fotochemische Abbau* durch UV-Bestrahlung der Polymerformmassen als auch der *biologische Abbau* beschleunigen. Beim *mikrobiellen Abbau* dienen die Polymere den Mikroorganismen als Kohlenstoffquelle, in einigen Fällen als Stickstoffquelle. Polymere können auch indirekt durch Mikroorganismen als Folge der durch mikrobielle Prozesse auftretenden Wärme bzw. der in diesem Zusammenhang ablaufenden chemischen Prozesse abgebaut werden. Wenn die Polymere selbst nicht abgebaut und nur die übrigen Rezepturbestandteile (z. B. Füllstoffe, Weichmacher) angegriffen werden, so spricht man von einem *„scheinbaren" Abbau*, wodurch die polymeren Festkörper verspröden.

Aus dem gezielten Abbau resultieren jedoch auch einige wichtige zusätzliche Probleme:

– Die sensibilisierten Polymerwerkstoffe dürfen keinem merklichen Abbau unterliegen, solange sie noch ihre Funktion als Formteil oder Halbzeug zu erfüllen haben (Wechselbeziehungen Verarbeitung/Anwendung).

– Die Abbauprozesse müssen absolut beherrschbar sein, da es andernfalls durch Folgeerscheinungen zu unangenehmen volkswirtschaftlichen Konsequenzen kommen könnte, wie das z. B. beim mikrobiellen Abbau zu erwarten ist, wenn er unkontrollierbar wird.

– Eine umfassende Kenntnis der Zerfallsprodukte ist auf jeden Fall erforderlich, um eine zusätzliche negative Beeinflussung der Umwelt vermeiden zu können.

Müllverbrennung. Bei Anwesenheit von Polymeren im Müll sind die unterschiedlichen Verhaltensweisen dieser Werkstoffe bei der Verbrennung sowie die eventuellen Auswirkungen der in Qualität und Quantität davon abhängenden Verbrennungsprodukte auf die Umwelt zu berücksichtigen. Man darf aber feststellen, daß die technische Realisierung derartiger Verbrennungsprozesse im wesentlichen beherrscht wird und sich solche zwar investitionsintensiven Anlagen in geeigneten Größenordnungen in verhältnismäßig kurzer Zeit amortisieren (u. a. durch Energiegewinnung und Einsparung herkömmlicher Brennstoffe).

Verfahren zur gezielten *thermischen Zersetzung* der Makromoleküle werden in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen:

– Aufspaltung der Polymermoleküle durch Zufuhr von Wärmeenergie in Abwesenheit von Sauerstoff und Wasserstoff unter Vakuum oder Inertgas (Pyrolyse),

– oxydative Spaltung der Polymermoleküle bei höherer Temperatur und Verbrennung bei Sauerstoffmangel (*oxydative Degradation*),

– Spaltung der Polymermoleküle durch Zufuhr von Wärmeenergie in Gegenwart von Wasserstoff oder Wasser mit oder ohne Katalysatoren (*hydrierende Degradation*).

Wiederverwendung als Sekundärrohstoffe. Die international ständig wachsenden Aufwendungen für die Bereitstellung von Roh- und Werkstoffen u. a. Grenzen für weitere erhebliche Steigerungen des Primärrohstoffaufkommens zwingen zunehmend zum Einsatz von Sekundärrohstoffen. Daraus resultiert auch für die Beseitigung der Polymerabfälle eine zusätzliche Variante, die in mehrfacher Hinsicht aufgrund folgender Faktoren eine erhebliche volkswirtschaftliche Bedeutung hat:

– Erschließung zusätzlicher Werkstoffreserven,

– Einsparung von Kosten für die Gewinnung von Primärwerkstoffen,

– Einsparung von Kosten für die Müllbeseitigung.

Der Anteil der einzelnen Polymerwerkstoffe bzw. -werkstoffklassen am Sekundärrohstoffeinsatz wird selbstverständlich unterschiedlich und im wesentlichen von der chemischen Struktur, der Rezepturzusammensetzung, den Eigenschaftskennwerten und -kennfunktionen sowie von Einsatzart und -dauer der Primärwerkstoffe abhängig sein, so daß gegenwärtig und in naher Zukunft in bezug auf eine mehrmalige Nutzung mit der Reihenfolge Plastomere → Elastomere → Duromere zu rechnen ist.

5.2. Elastwerkstoffe

5.2.1. Eigenschaften von Gummi

Gummi ist ein hochpolymerer Stoff, der durch Vernetzung von Kautschukmischungen gebildet wird. Sein Aufbau und seine Eigenschaften werden grundlegend durch das Zusammenwirken der Rohstoffe Kautschuk, Füllstoff und Weichmacher (Dreistoffsystem) bestimmt. Weiterhin werden die Eigenschaften durch die Verarbeitung und die Formgebung beeinflußt.

Elastomere, zu denen alle Produkte aus natürlichen und synthetischen Kautschuken sowie kautschukähnlichen Stoffen zählen, unterscheiden sich nach *Timm* von den Plastomeren und Duromeren durch folgende physikalisch-mechanische Hauptmerkmale:

Elastomere sind vorwiegend amorphe, hochpolymere Stoffe mit Einfriertemperaturen unterhalb der Raumtemperatur, die weitmaschig vernetzt oder strukturell gleichwertig fixiert sind. Sie umfassen einen E-Modul-Bereich von 1 bis 10^2 N/mm^2 bei Gebrauchstemperaturen. Ihre wichtigste Eigenschaft besteht in einem stofflichen Zustand, der praktisch keine plastischen Deformationen erlaubt und im Gebrauchsbereich hochelastische Formänderungen gewährleistet.

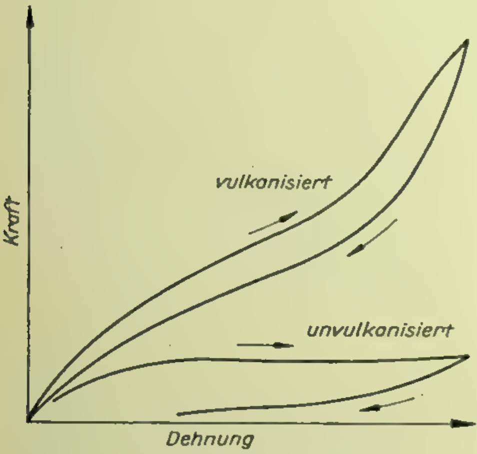


Abb. 5.2.1-1 *Kraft-Dehnungs-Kurven von vulkanisiertem und unvulkanisiertem Naturkautschuk*

Die Vernetzung des in einem Gummiteil enthaltenen Kautschuks führt zur Bildung eines Riesenmoleküls unendlich großer Molmasse. Im Unterschied zu den Kautschuken ist Gummi praktisch unlöslich; er kann jedoch quellen. Treten dabei sehr hohe Quelldrücke auf, so ist mit einer Zerstörung der Vernetzungsstellen zu rechnen. Gummi kristallisiert i. allg. nicht. Eine Ausnahme bilden z. B. Naturkautschukvulkanisate, die beim Dehnen eine teilweise Kristallisation erkennen lassen. Das thermodynamische Verhalten von Gummi kann durch Anwendung der Gasgesetze beschrieben werden. Aus dem Kraft-Dehnungs-Diagramm (Abb. 5.2.1-1) geht hervor, daß nur der vernetzte Kautschuk unter Einleitung einer Kraft reversibel verformbar ist. Der S-förmige Verlauf der Kraft-Dehnungs-Kurve gehorcht bis zu ≈ 5% Verformung weitestgehend dem Hookeschen Gesetz. Das Deformationsverhalten von Elastomeren wird durch *energie-* und *entropieelastische Verformungen* beschrieben, die sich im gesamten Dehnungsbereich überlagern. Bei geringen Dehnungen überwiegen energieelastische, bei starken Dehnungen entropieelastische Verformungen. Die vom auf- und absteigenden Kurvenzug eingeschlossene Fläche stellt einen Arbeitsverlust dar, der durch Umsetzung mechanischer Arbeit in Wärme bedingt ist (*Hysterese*). Die Restdehnung des unvulkanisierten Kautschuks ist im

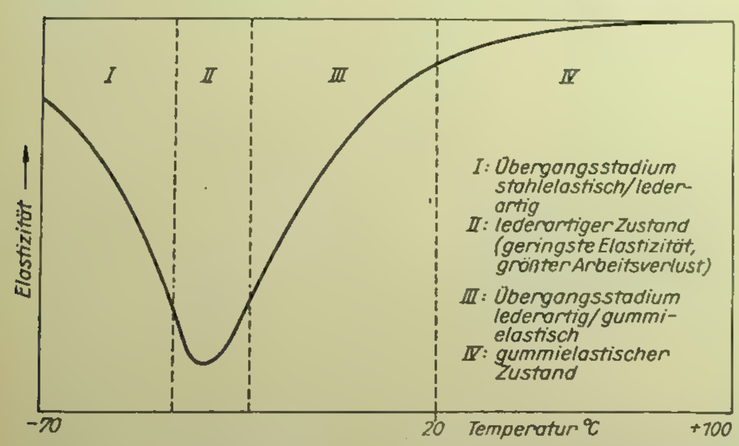


Abb. 5.2.1-2 *Rückprallelastizität von Weichgummi in Abhängigkeit von der Temperatur*

Vergleich zum vulkanisierten Kautschuk sehr groß und läßt sich durch das Fehlen von Vernetzungsstellen im Molekülverband erklären. Die Hochelastizität des Gummis unterliegt einer starken Temperaturabhängigkeit. Die in Abb. 5.2.1-2 dargestellten Stadien zeigen, daß sich dem gummielastischen Stadium in Richtung tieferer Temperaturen ein leder- und ein stahlelastisches Stadium anschließen. Die Kenntnis des Temperatur-Elastizitäts-Verhaltens von Weichgummi ist deshalb für seinen Einsatz unterhalb der Raumtemperatur besonders wichtig. Unter Gebrauchstemperaturen (≈ -30 bis $+90\,°C$) und atmosphärischem Druck verhält sich Gummi chemisch relativ indifferent. Starke Oxydationsmittel, wie Chlor, oxydierende Säuren u. a., können allerdings zum Abbau der Kautschukmoleküle führen. Durch Sauerstoff, Ozon, Wärme und Licht an den Oberflächen und an durch Spannungen besonders beanspruchten Stellen einsetzende Zerstörungen, wie Rißbildung oder Versprödung, bezeichnet man als *Alterung*. Sie wird durch Spuren von Schwermetallen, wie Kupfer, Mangan und Eisen (*Gummigifte*), katalytisch begünstigt und kann zu starken Veränderungen physikalisch-mechanischer Eigenschaften, wie Zerreißfestigkeit, Dehnung, Härte u. a., führen. Besonders alterungsanfällig sind an Doppelbindungen reiche Kautschuke (Naturkautschuk, Styrol-Butadien-Kautschuke).

Gummierzeugnisse zur Verpackung und Beförderung von Lebensmitteln sowie für die Medizintechnik verlangen physiologisch unbedenkliche Roh- und Hilfsstoffe, die weder durch Wasserdampf, Heißwasser, verdünnte organische Säuren, noch durch Öle und Fette aus den Vulkanisaten herausgelöst werden. Auch geruchsintensive, abfärbende und den Geschmack beeinträchtigende Mischungsbestandteile sind zu vermeiden.

5.2.2. Roh- und Hilfsstoffe zur Herstellung von Gummi

Kautschuke sind hochmolekulare, ungesättigte oder weitestgehend gesättigte Polymere, z. B. Polymere aus Dienen oder Alkenen. Die Ketten können aus Kohlenstoff, Kohlenstoff/Sauerstoff, Silizium/Sauerstoff, Kohlenstoff/Schwefel o. a. kettenbildenden Atomen aufgebaut sein. Die Moleküle synthetischer Kautschuke sollen möglichst in sich frei drehbar sein. Durch diese Forderung ist die Synthese von Kautschukmolekülen relativ eng festgelegt. Funktionelle Gruppen, die die freie Drehbarkeit einschränken, aber noch ausreichend gewährleisten, sind $-Cl$, $-Br$, $-CN$, $-CH{=}CH_2$, $-COCH_3$. Die funktionellen Gruppen bestimmen zugleich die *Polarität* des Polymeren und damit seine Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln. Oft ist mit der Erhöhung der Polarität eine Erhöhung der Einfriertemperatur verbunden. Bei Raumtemperatur sind Kautschuke hochviskose Stoffe mit thermoplastischen Eigenschaften.

Naturkautschuk (NK) $-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}{=}CH-CH_2-$

wird zum größten Teil aus dem milchartigen Saft (*Latex*) des Kautschukbaums (*hevea brasiliensis*) durch Zapfung gewonnen. Die Hauptanbaugebiete sind Malaysia, Indonesien, Thailand, Brasilien und afrikanische Länder. Jährlich werden auf der Welt über 2 Mio t hochwertigen Plantagenkautschuks erzeugt. Der Latex enthält 25 bis 35% Kautschuksubstanz, 65 bis 75% Wasser, je 1 bis 2% Harze und Proteine, Spuren von Zucker, Fettsäuren und Mineralstoffen. Durch Ansäuern mit Essig- oder Ameisensäure wird der Kautschuk aus dem Latex ausgefällt. Das *Koagulat* wird auf Riffelwalzwerken gewaschen, zu Fellen ausgewalzt und getrocknet (*Crepe*). Als *smoked sheets* bezeichnet man Naturkautschuk, der aus Latex in flachen Pfannen ausgefällt und nach dem Waschen, Trocknen und Walzen zur Konservierung geräuchert wird. In kleineren Mengen arbeitet man Latex im Heißluftstrom zu *Sprühkautschuk* auf oder setzt ihn direkt zur Herstellung nahtloser Gummiwaren (vgl. 5.2.4.) ein.

Die Kautschuksubstanz besteht zu $\approx 94\,\%$ aus Kautschukkohlenwasserstoffen und liegt als *1,4-cis Polyisopren* mit der Summenformel $(C_5H_8)_n$ vor. Die Molmasse bewegt sich zwischen 300000 und 700000. Naturkautschuk ist löslich in halogenierten Kohlenwasserstoffen, Benzol und Benzin. Er löst sich nicht in Azeton, Alkohol und Wasser. Mit Schwefel, organischen Peroxiden u. a. Vulkanisationsmitteln läßt sich Naturkautschuk leicht zu *Weichgummivulkanisaten* vernetzen. Er enthält bis zu 45 % Schwefel und zeigt dann als *Hartgummi* thermoplastisches Verhalten. Naturkautschuk ist ein Allzweckkautschuk, der insbesondere in der Kfz-Reifenfertigung, Fördergurtherstellung, Fertigung technischer Formartikel, Medizintechnik und zur Herstellung von Erzeugnissen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen, einen wichtigen Platz einnimmt. Neben Plantagenkautschuk haben der *Wildkautschuk (Parakautschuk)*, der *Balata-Kautschuk*, die *Guttapercha* u. a. kautschukartige Naturprodukte kaum wirtschaftliche Bedeutung erlangt. In der UdSSR wird aus Kok-Saghyz, einer hauptsächlich in den Wurzeln latexführenden Löwenzahnart, Kautschuk gewonnen.

Styrol-Butadien-Kautschuke (SBK) sind *Misch-*

$-CH_2-CH{=}CH-CH_2-CH_2-\underset{\displaystyle C_6H_5}{\underset{|}{CH}}-$

polymerisate unterschiedlicher Zusammensetzung aus *Butadien* $CH_2{=}CH-CH{=}CH_2$

und *Styrol* $CH_2=CH$. Diese Kautschuke werden

```
             |
            C6H5
```

als Massenkautschuke verwendet und zeichnen sich gegenüber Naturkautschuk vor allem durch ein besseres Alterungsverhalten, höhere Hitzebeständigkeit und größere Quellfestigkeit gegen Fette und Öle aus. Weniger gut ist die Konfektionsklebrigkeit (vgl. 5.2.4.) dieser Kautschuke entwickelt. Die mechanischen Eigenschaften der SBK werden durch Zumischen aktiver Füllstoffe, besonders aktiver Ruße, merklich verbessert. Ein günstigeres Verarbeitungsverhalten wurde mit der Entwicklung der Kaltkautschuke (*Cold Rubber*) durch Absenkung der Polymerisationstemperatur auf 5 °C erreicht. SBK werden in großem Umfang zur Fertigung von Kfz-Reifen, Fördergurten, Kabeln und Schläuchen eingesetzt. Durch Zugabe geeigneter Erdölfraktionen im Latexzustand lassen sich gut verarbeitbare, kostengünstige „ölverstreckte Kautschuke" herstellen.

Polyisoprenkautschuk (IK)

```
H    H       H    H
|    |       |    |
C == C       C == C
|    |       |    |
CH2  CH2 --- CH2  CH2
|                 |
```

wird durch Polymerisation von *Isopren* mit *Ziegler-Katalysatoren* gewonnen, wodurch eine dem Naturkautschuk weitestgehend gleichwertige Struktur (Verkettung der Isoprenmoleküle in 1,4-cis-Stellung) erzielt wird. Stereoregulierter IK entspricht in seinem dynamischen Verhalten dem Naturkautschuk, die Wärmestabilität ist geringer. Der Verarbeitung von IK geht wie beim Naturkautschuk gewöhnlich eine *Mastikation* (vgl. 5.2.3.) voraus. Man setzt IK neben NK zur Herstellung von Bereifungen für Kraftfahrzeuge, Fördergurten, technischen Artikeln und zur Fabrikation heller, lichtechter Gummiwaren ein.

Polybutadienkautschuk (BK)

```
H    CH3     H    CH3
|    |       |    |
C == C       C == C
|    |       |    |
CH2  CH2 --- CH2  CH2
|                 |
```

läßt sich mit Hilfe von Ziegler-Natta-Katalysatoren aus Butadien mit einem hohen 1,4-cis-Anteil polymerisieren. Besonders wertvolle Eigenschaften sind hoher Abriebwiderstand und sehr gutes Gebrauchsverhalten bei tiefen Temperaturen. Das Haupteinsatzgebiet von BK liegt in der Reifenindustrie.

Butadien-Acrylnitril-Kautschuke (NBK) sind

```
–CH2–CH=CH–CH2–CH2–CH–
                   |
                   CN
```

Mischpolymerisate unterschiedlicher Zusammensetzung aus *Butadien* $CH_2=CH-CH=CH_2$ und *Acrylnitril* $CH_2=CH$. Die Acrylnitril-

```
        |
        CN
```

gruppe bewirkt die Polarität dieses Kautschuks und damit seine gute Beständigkeit gegenüber unpolaren Lösungsmitteln. Zunehmende Acrylnitrilgehalte verstärken diese Eigenschaft, vermindern aber Weichheit und Elastizität der Vulkanisate. Nicht nur ausgeprägte Alterungs- und Wärmebeständigkeit zeichnen die NBK-Vulkanisate aus, sondern auch gute Zerreiß-, Struktur- und Abriebfestigkeit. Ihre Einsatzgebiete liegen vor allem im Maschinen- und Fahrzeugbau mit einem hohen Bedarf an öl- und benzinfesten Dichtungen und Formartikeln. NBK-Latices werden auch als Streich- und Imprägniermittel eingesetzt.

```
                            R     R     R
                            |     |     |
Silikonkautschuke (SiK)   –Si–O–Si–O–Si–O–
                            |     |     |
                            R     R     R
```

sind hochmolekulare siliziumorganische Verbindungen, die man auch als Silikone bezeichnet (vgl. 4.10.3.). Ihr Grundgerüst besteht aus Silizium-Sauerstoff-Ketten. Die Siliziumatome sind mit organischen Seitengruppen, z. B. $-CH_3$, $-C_2H_5$, abgesättigt. Das wichtigste Merkmal der Silikonkautschuke besteht in ihrem sehr guten Gebrauchsverhalten innerhalb eines Temperaturfelds von ≈ -100 bis $+300$ °C. Sie widerstehen langzeitig der Einwirkung von Atmosphärilien (auch Ozon) und Licht. Aufgrund ihres indifferenten Verhaltens finden sie bevorzugt in der Medizintechnik, als Lebensmittelverpackung und auf pharmazeutischem Gebiet Verwendung. Silikonkautschuke werden auch als hochwertiges Dichtungsmaterial, Kabelummantelungen und zur Herstellung von Mitläuferstoffen gebraucht. Als Ein- und Zweikomponentenpasten benutzt man sie zur Lösung spezieller Dichtungsprobleme und zur Anfertigung elastischer Formen durch Abgüsse.

Sonderkautschuke. Die Haupteinsatzgebiete liegen im Anwendungsbereich technischer Gummiwaren für den Maschinen-, Fahrzeug-, Schiffs- und Flugzeugbau, den Bergbau und das Bauwesen. Zu den wichtigsten Sonderkautschuken zählt man: *Chlorbutadienkautschuk (CK), Butylkautschuk (IIK), Polysulfidkautschuk (ET), Chlorsulfoniertes Polyäthylen (CSM), Polyurethanelastomere (PUR), Acrylatkautschuk (ACK), Fluorkautschuk (FPM), Äthylen-Propylenkautschuk (EPDM).*

Füllstoffe. Die Verarbeitung von Füllstoffen in Kautschukmischungen dient vor allem der gezielten Beeinflussung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Vulkanisate zur Anpassung an das Einsatzgebiet, ihrer Einfärbung und der Senkung des Mischungspreises.

Ruße. Abhängig von der Rohstoffbasis und den für die Rußherstellung zur Anwendung gelangenden Verfahren unterscheidet man zwischen *aktiven* und *halbaktiven Rußen* mit Teilchengrößen von ≈ 25 bis 250 nm. Aktive Füllstoffe, besonders aktive Ruße, zeichnen sich dadurch aus, daß sie mit steigender Zugabe zum Kautschuk die mechanischen Eigenschaften der Vulkanisate verbessern. Bei einem bestimmten Mengenverhältnis des Systems Elastomer/Füllstoff wird ein Optimum erreicht. Ursache dafür sind zwischen den Füllstoffteilchen sowie zwischen den Füllstoff- und Kautschukpartikeln bestehende Grenzflächeneffekte, die sowohl chemischer als auch physikalischer Natur sein können (Wirkung funktioneller Gruppen und Radikale an den Rußoberflächen, *van der Waalssche Kräfte*, Bildung gebundenen Kautschuks, sog. „*bound rubber*"). Große Mengen aktiver Ruße werden bei der Fertigung hochbeanspruchter Gummierzeugnisse eingesetzt, z. B. Reifenlaufflächen, Deckplatten für Fördergurte, Reibrollen u. a. Halbaktive Ruße verarbeitet man bevorzugt, wenn Gummierzeugnisse mit besonders guten elastischen Eigenschaften hergestellt werden sollen. Elektrisch leitfähige Gummierzeugnisse, z. B. drahtlose Zündkabel für Kraftfahrzeuge, werden unter Verwendung von leitfähigen Rußen gefertigt.

Helle Füllstoffe werden vor allem zur Fertigung farbiger und weißer Gummiartikel eingesetzt. Je nach Teilchengröße, Kristallstruktur und Verstärkerwirkung im Kautschuk unterscheidet man gleichermaßen zwischen aktiven, halbaktiven und inaktiven hellen Füllstoffen. *Aktive helle Füller* (Kieselsäure, Kieselsäure-Tonerde-Gemische) haben eine Teilchengröße von ≈ 20 bis 100 nm und zeigen die Eigenschaften typischer Verstärkerfüllstoffe. Sie beeinflussen die Zerreißfestigkeit und das Abriebverhalten von Gummiqualitäten positiv. Ähnlich wie bei Rußen wird mit zunehmender Aktivität des Füllstoffs die Einarbeitung in den Kautschuk erschwert. Zu den *halbaktiven Füllstoffen* zählt man z. B. gefälltes basisches Magnesiumkarbonat, Kieselkreide und einige Kaolinsorten. *Inaktive Füllstoffe* (Kreide, Schwerspat, Schiefermehl u. a.) werden vorwiegend als billige Streckmittel, in manchen Fällen als Pigmentfarbstoffe, eingesetzt. Besondere Bedeutung kommt einigen Metalloxiden zu, die gleichzeitig als Füllstoff und als Vulkanisationsaktivator (z. B. Zinkoxid, Bleioxid) wirken oder zur Bindung von Säuren und Wasser (z. B. Kalzium-, Magnesiumoxid) in Kautschukmischungen Anwendung finden können.

Weichmacher. Die Einarbeitung von Weichmachern in Natur- und Synthesekautschuk dient neben der Plastizitätseinstellung der Kautschukmischungen der besseren Verteilung der Füllstoffe im Kautschuk und der Entwicklung bestimmter Vulkanisateigenschaften. Wie bei den Füllstoffen können auch wirtschaftliche Erwägungen eine gewisse Rolle spielen. Außer rein synthetischen Produkten, wie z. B. Glykoläther, Dibutylphthalat, finden in der Gummiindustrie in großem Umfang Erdölweichmacher Verwendung. Für spezielle Zwecke kommen Kohlen- und Holzteer sowie tierische und pflanzliche Öle und Fette als Ausgangsstoffe in Frage. Nach *Kleemann* ist es zweckmäßig, die Weichmacher nach reinen Kohlenwasserstoffen und solchen, die polarisierend wirkende Gruppen enthalten, zu unterscheiden. Dementsprechend werden sie in der Kautschukmischung entweder bevorzugt als Gleitmittel oder mehr als quellende Weichmacher wirksam, die sich mit ihrer Kohlenwasserstoffkette in den Kautschuk einlagern und über die polaren Gruppen mit den Füllstoffen in Wechselwirkung treten. Zur Verbesserung des Tieftemperaturverhaltens von Gummi setzt man der Kautschukmischung vielfach *Esterweichmacher* zu. Für Medizin- und Lebensmittelqualitäten werden reines *Paraffinöl* oder Pflanzenöle als ungiftige Weichmacher benutzt. Zu den halbfesten und festen Weichmachern gehören außer den *Verteilern* (Fettsäuren) die *Schutzwachse* (Paraffine) und die *Klebrigmacher* (natürliche und synthetische Harze). Eine Verbesserung der Füllstoffaufnahme, der Extrudierbarkeit und der Formbeständigkeit frei zu vulkanisierender Mischungen erreicht man durch Anwendung sog. *Faktisse*. Sie werden durch Behandlung ungesättigter pflanzlicher, tierischer oder mineralischer Öle und Fette mit Schwefel oder Chlorschwefel gewonnen.

Vernetzungsmittel. Durch Zusatz kleiner Mengen Schwefel und Metalloxide lassen sich Doppelbindungen enthaltende Kautschuke unter Einwirkung von Wärme aus dem plastischen in den elastischen (*gummielastischen*) Zustand überführen. Dieser Effekt wurde 1839 durch *Goodyear* am Naturkautschuk entdeckt, womit dessen eigentliche wirtschaftliche Nutzung begann.

Die mit der Vulkanisation des Kautschuks verbundenen strukturellen Veränderungen erklärt man durch verschiedenartige Theorien, von denen die sog. *Quervernetzungstheorie*, durch

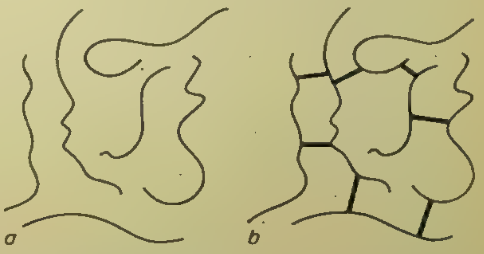


Abb. 5.2.2-1 Kautschukmoleküle: a frei nebeneinanderliegend, b durch Schwefelbrücken vernetzt (schematisch)

experimentelle Nachweise gestützt, besonders verbreitet ist. Danach werden die langkettigen Kautschukmoleküle stegartig durch *Schwefelbrücken* miteinander verknüpft (*intermolekularer Brückenschwefel*) (Abb. 5.2.2-1). Gleichzeitig kann innerhalb ein und desselben Makromoleküls eine ringartige Einlagerung mehratomiger Schwefelmoleküle zur Bildung des *intramolekularen Ringschwefels* führen, der bei der Vulkanisation mit entsteht und bestimmte Vulkanisateigenschaften, wie Festigkeit, Alterungsbeständigkeit, vor allem aber das Wärmealterungsverhalten, ungünstig beeinflußt. Die Schwefelvernetzung vollzieht sich nicht an jeder Doppelbindung; sie ist „weitmaschig". Mit steigender Schwefeldosierung erhöht sich der Grad der Vernetzung. Dementsprechend unterscheidet man zwischen *Weichgummi* (bis 5 % Schwefel), *Halbhartgummi* (5 bis 25 % Schwefel) und Hartgummi (32 bis 45 % Schwefel) bezogen auf die Masse des Kautschuks. Neben Schwefel als gebräuchlichstem Vulkanisationsmittel läßt sich die *Kautschukvernetzung* aber auch frei von elementarem Schwefel, z. B. durch Thiuramdisulfid oder durch Derivate des Nitro- und Nitrosobenzols, herbeiführen. *Butylkautschuk* wird als Spezialkautschuk zur Fertigung hochtemperaturbeständiger Vulkanisate z. B. auch mit p-Chinondioxim oder modifizierten Alkylphenolharzen vernetzt (Fertigung von Dampfschläuchen, Spezialdichtungen, Heizbälgen und -membranen für die Kfz-Reifenherstellung). Organische Peroxide werden insbesondere zur Vernetzung gesättigter Polymere eingesetzt, die sich mit Schwefel nicht vernetzen lassen. Beim Zerfall der Peroxide bilden sich Radikale, die der Kohlenwasserstoffkette des Polymers Wasserstoffatome entreißen. Die so entstehenden Kohlenstoffradikale verbinden sich untereinander durch Bildung von C–C-Bindungen. Eine Vernetzung ist auch durch die Einwirkung energiereicher Strahlung möglich.

Vulkanisationsbeschleuniger ermöglichen die Vernetzung unter schonenderen Bedingungen, d. h. mit geringeren Schwefeldosierungen bei niedrigeren Temperaturen in wesentlich kürzeren Vulkanisationszeiten. Sie stellen organische Verbindungen dar, die man hinsichtlich ihrer die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussenden Wirkung in *Ultrabeschleuniger* (z. B. Verbindungen der Dithiocarbaminsäure), *Halbultrabeschleuniger* (z. B. Merkaptobenzthiazol und dessen Derivate) und *schwache Beschleuniger* (z. B. Harnstoff- und Guanidinderivate) unterteilen kann.

Die Beschleunigung der Vulkanisationsreaktionen wird auf eine katalytische Wirkung freier Schwefelionen bzw. aminischer Verbindungen zurückgeführt, die während des Vulkanisationsprozesses durch thermischen Zerfall der Beschleuniger entstehen und das als S_8-Ring vorliegende Schwefelmolekül unter Bildung einer Kette mit radikalischen Kettenenden aufspalten.

Alterungsschutzmittel. Die durch Sauerstoff an ungesättigten Polymeren verursachte Alterung ist mit der Bildung peroxidischer Radikale, die sich in Hydroperoxide umwandeln, verbunden. Erhöhte Temperaturen (Wärmeeinwirkung) begünstigen deren Zerfall, wobei OH-Radikale entstehen. Diese führen erneut zur Bildung von Peroxidradikalen. Der Ablauf dieser Reaktionen wird durch geringe Mengen von Schwermetallen katalysiert (vgl. 5.2.1.). Die Wirkung der Alterungsschutzmittel beruht auf der Bildung inaktiver Verbindungen aus den primär auftretenden Radikalen. Derartige Abbruchreaktionen erzielt man durch Zugabe bestimmter aromatischer Verbindungen, z. B. sekundäre aromatische Amine, Derivate des Phenols, zur Kautschukmischung.

5.2.3. Mischungsherstellung

Rezepturgestaltung. Im Gegensatz zu den Plastwerkstoffen, die gewöhnlich aus einer einheitlichen Molekülart aufgebaut sind, stellt Gummi eine hochdisperse Mischung von Füllstoffen, Weichmachern u. a. Hilfsstoffen in natürlichen und synthetischen Kautschuken dar. Die Eigenschaften des Elastwerkstoffs werden i. allg. erst durch das Zusammenwirken der einzelnen Mischungskomponenten entwickelt, wobei allerdings Art und Menge des Elastomers den entscheidenden Einfluß ausüben. Trotzdem sind meist nicht alle gewünschten Erzeugniseigenschaften gleichzeitig voll erfüllbar. Es wird deshalb besonderer Wert auf die Einhaltung der jeweiligen Hauptanforderungen gelegt. Stark verallgemeinert hat eine *Rezeptur* auf der Basis von Festkautschuk folgenden Aufbau: 100 Teile Kautschuk, 10 bis 40 Teile Weichmacher, 10 bis 150 Teile Füllstoffe, 1 bis 5 Teile Verarbeitungshilfsmittel, 1 bis 3 Teile eines Vernetzungssystems.

Zur Fertigung hohler, massiver sowie *zelliger Gummierzeugnisse* setzt man geeignete Elastomere auch in Form von *Lösungen* oder *Dispersionen* (Latexmischungen) ein (vgl. 5.2.4.). Die empirische Entwicklung von Mischungsrezepturen wird zunehmend durch Anwendung wissenschaftlicher Methoden verdrängt. So ist es möglich, durch Aufnahme von Schichtliniendiagrammen oder über die Bildung mathematischer Funktionen die zwischen den einzelnen Mischungsingredienzien bestehenden Wechselwirkungen grafisch oder rechnerisch zu erfassen.

Mischprozesse. Der Mischprozeß stellt eine der wichtigsten technologischen Stufen dar, da eine effektive Mischungsaufbereitung nur dann verwirklicht ist, wenn es mit den gegebenen Rohstoffen und technischen Mitteln gelingt, bei geringstem Aufwand an Energie und Arbeitszeit

eine weitestgehend gleichmäßige Verteilung aller Mischungsbestandteile im vorgelegten Elastomer zu erzielen. Die für die Verarbeitung von Festkautschuken gebräuchlichen Mischaggregate sind *Mischwalzwerke*, *Kneter* oder *Innenmischer* und *Mischextruder*. In jüngerer Zeit beginnen sich neue Mischtechnologien herauszubilden, die sich mit der Verarbeitung von Pulver- und Flüssigkautschuken befassen. Die Dispergierbarkeit der Füllstoffe im Festkautschuk hängt im wesentlichen von deren Teilchengröße, Struktur, Oberflächenbeschaffenheit und dem Elastomertyp ab. Kautschukmischungen zählen zu den sog. „äußeren" Mischungen. Ihre Herstellung vollzieht sich in 2 Phasen, wenn man als Füllstoff Ruße einsetzt. Beim *Einmischen* werden Rußagglomerate im Kautschuk gebildet und dann beim *Fertigmischen* wieder zerstört.

Bei der Verarbeitung von Naturkautschuk geht dem eigentlichen Mischprozeß die *Kautschukmastikation* voraus. Man versteht darunter einen mechanisch-oxydativen Abbau des NK-Moleküls, der durch Scherung bei gleichzeitiger Einwirkung von Luftsauerstoff hervorgerufen wird. Dabei tritt eine Viskositätserniedrigung ein, wodurch überhaupt erst eine weitere Verarbeitung des Kautschuks, insbesondere die Aufnahme von Füllstoffen, ermöglicht wird. Die hierzu eingesetzten technischen Mittel sind ebenfalls Walzen, Kneter und Schneckenmaschinen. Durch Einwirkung chemischer Hilfsmittel, wie aromatische Disulfide, halogenierte Thiophenole u. a., kann der *Kautschukabbau* beschleunigt und damit energetisch günstig beeinflußt werden. Synthetische Kautschuke werden heute zumeist mit einer verarbeitungsgerechten Einstellung der mittleren Molekularmasse vom Hersteller geliefert.

Mischwalzwerke bestehen im wesentlichen aus dem Walzengestell, axial durchbohrten und mit Wasser kühlbaren Walzen, einer Fellwendeeinrichtung, dem Antrieb und Kuppelrädern (Abb. 5.2.3-1). Die Walzen- oder Ballenlängen von Mischwalzwerken reichen von 200 bis 2300 mm bei Antriebsleistungen von 5 bis 200 kW. Das Mischen des Kautschuks mit den übrigen Rohstoffen vollzieht sich durch fortwährende Druckverformungen im Walzenspalt. Dieser Vorgang wird durch unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeiten (*Friktion*) der beiden gegenläufigen Walzen wirksam unterstützt. Der Mischeffekt auf Walzwerken ist stark abhängig von der exakten Einhaltung der Reihenfolge der Rohstoffzugaben und der Temperaturführung des Mischgutes. Trotz der gegenüber Knetern und Mischextrudern weitaus geringeren Produktivität hat das Mischwalzwerk bis in die Gegenwart hinein eine gewisse Bedeutung behalten. Wegen seiner frei wählbaren Maschineneinstellparameter, wie Spaltbreite, Friktion, Temperatur, findet es vor allem zur Herstellung von Spezialmischungen besonders hoher Gleichmäßigkeit Verwendung. Der gegenüber Knetern und Extrudern wesentlich geringere Investitionsaufwand und die universelle Einsetzbarkeit sind Gründe dafür, daß man Mischwalzwerke insbesondere in Kleinbetrieben antrifft. In Großbetrieben dienen sie i. allg. nur noch zum Kühlen und Vorwärmen fertiger Mischungen, zur Einarbeitung von Vernetzungsmitteln und als Verkettungseinrichtung zwischen Knetern zur Formung ausgestoßener, unregelmäßig gestalteter Mischungsklumpen.

Innenmischer (Kneter) haben Nutzvolumina bis zu einigen 100 ℓ. Die Größe der Innenmischer wird durch das sog. *effektive Nutzvolumen* angegeben. Es beträgt bei einem prinzipiell gleichartigen Aufbau aller Kneter (Abb. 5.2.3-2) das ≈ 0,7fache des Mischkammerinhalts. Die notwendige Abführung der beim Mischvorgang entstehenden großen Wärmemenge begrenzt gegenwärtig das Nutzvolumen auf max. 600 ℓ bei

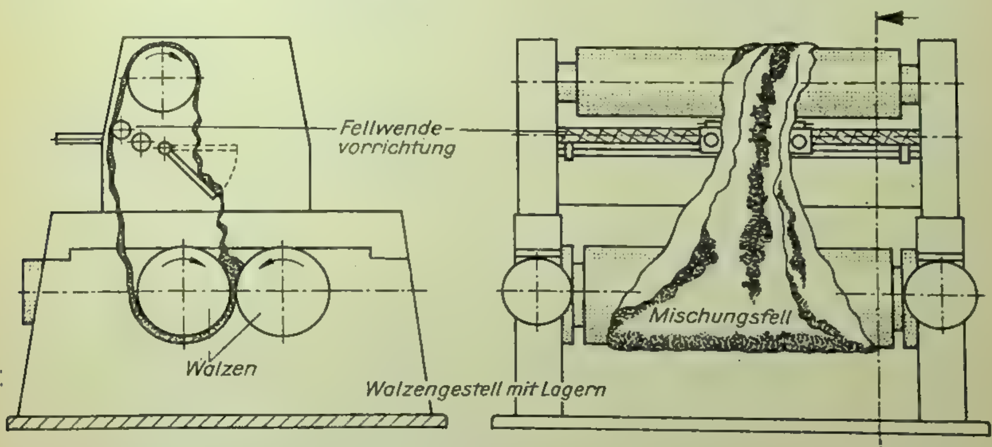


Abb. 5.2.3-1 Mischwalzwerk mit Fellwendevorrichtung

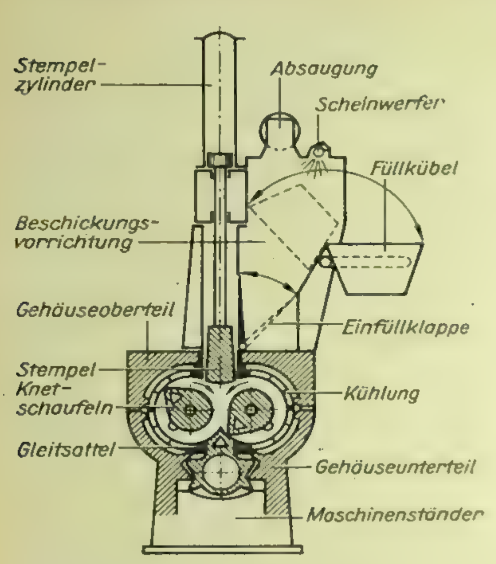


Abb. 5.2.3-2 Innenmischer mit Stempel

Antriebsleistungen bis zu 3000 kW. In der Mischkammer, einem besonders wichtigen Bauteil des Innenmischers, befinden sich *Knetschaufeln*, die durch gegenläufige Drehungen die Vermischung der einzelnen Rohstoffe bewirken. Durch einen Stempel wird das Mischgut bei modernen Mischern mit einem einstellbaren Druck in die Mischkammer hineingepreßt. So lassen sich höhere Mischeffekte bzw. kürzere Mischzeiten erzielen. Die Austragsöffnung des Innenmischers wird durch einen Gleit- oder Klappsattel verschlossen. Je nach Art der Kautschukmischung beträgt die Arbeitsproduktivität eines Kneters das Mehrfache eines von der Mischungsmasse her vergleichbaren Mischwalzwerks. Die Mischungsherstellung wird mit Innenmischern häufig über mehrstufige, im gleichen oder auch in verschiedenen Mischern nacheinander ablaufende Mischprozesse vorgenommen. Sehr verbreitet ist das *Zweistufen-Mischverfahren*:

1. Stufe:
Herstellung der Grundmischung (Batchmischung) – Zwischenlagerung zum Auskühlen der Grundmischung
2. Stufe:
Einmischen des Vernetzungssystems (Schlußphase der Dispersion).

Mischextruder sind Schneckenmaschinen zur *kontinuierlichen Mischungsherstellung*. Aufeinander abgestimmte Geometrien von Schnecke und Zylinder sorgen für eine intensive Scherung und eine streckenweise gegen den Massestrom gerichtete Bewegung des Mischgutes. Probleme der Wärmeabführung und der hohe mechanische Verschleiß schränken die Verwendung dieser Maschinen auf relativ wenig gefüllte Mischungen ein und stehen derzeitig noch ihrem breiten Einsatz entgegen. Neuere Entwicklungen sowjetischer Doppelschneckenmischer erzielen bei einem Durchsatz von ≈ 800 kg/h Mischeffekt, die mit denen im Zweistufen-Mischverfahren unter Verwendung von Knetern üblichen vergleichbar sind.

5.2.4. Formgebungsverfahren

Die Qualität eines Gummierzeugnisses und die Wirtschaftlichkeit seiner industriellen Fertigung werden in starkem Maße durch den Formgebungsprozeß bestimmt. Er soll einen hohen Automatisierungsgrad erlauben und die Kopplung nacheinander ablaufender Arbeitsstufen zulassen. Für die Formgebung werden verschiedene Verfahren eingesetzt.

Pressen (Formpressen) oder Preßformung. Ein aus Kautschukmischung vorgeformter Rohling wird in ein Werkzeug eingelegt, das man in der Regel in eine Presse einlagert und unter Druck indirekt beheizt. Hierbei fließt die zur Vermeidung von Fehlstellen mengenmäßig um ≈ 5% überdosierte Kautschukmischung in die Werkzeughöhlungen ein. Je nach Größe des Formartikels, nach Mischungsaufbau und Vernetzungssystem dauert die unter Wärmeeinwirkung stattfindende Formgebung und Vernetzung von wenigen Minuten bis zu einer halben Stunde und länger an. Die Preßdrücke betragen 4 bis 30 MPa, die Vernetzungstemperaturen liegen gewöhnlich bei 150 °C. Es werden für die Preßformung *Austriebspreßwerkzeuge*, *Stempel-* oder *Positivpreßwerkzeuge* und *Stempel-Austriebs-Preßwerkzeuge* angewendet. Sehr häufig benutzt man die einfachen Austriebspreßwerkzeuge zur Fertigung technischer Artikel. Je nach dem erforderlichen Preßdruck wird die Vulkanisation in *Spindel-*, *Kniehebel-* oder *hydraulischen Vulkanisierpressen* vorgenommen. Letztere sind als Säulen- und Rahmenpressen in Gebrauch. Werkzeuge, die z. B. zur Beschickung mit Einlegeteilen von 3 Seiten zugänglich sein müssen, werden in sog. *Maulpressen* eingelegt. Die Beheizung von Vulkanisierpressen erfolgt zumeist mit Heißwasser oder Dampf, teilweise auch mit Ölumlauf- und elektrischer Widerstandsheizung.

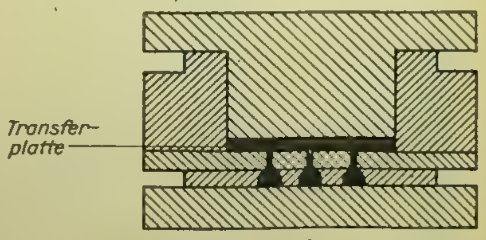


Abb. 5.2.4-1 Transferpreßwerkzeug

Spritzpressen ist eine Weiterentwicklung des Formpressens. Die Kautschukmischung wird aus einem Vorratsbehälter in die Werkzeughöhlung gedrückt. Das *Transfer-Moulding* stellt eine Variante des Spritzpressens dar. Durch den Schließdruck der Presse wird die Kautschukmischung aus einem werkzeugeigenen Vorratsbehälter in die beheizten Höhlungen des Werkzeugs befördert. Man benötigt dazu ein *Transfer-Werkzeug*, in dem der Rest der eingelegten Mischung als vulkanisierte Transferplatte verbleibt (Abb. 5.2.4-1).

Spritzgießen. Wie bei der Plastverarbeitung finden auch in der kautschukverarbeitenden Industrie *Spritzgießmaschinen* zur Herstellung von Gummiformartikeln zunehmend Verwendung. Das Spritzgießen ist ein Druckkraftgießen, bei dem ein Kolben oder Schneckenkolben die in einem Zylinder plastizierte Kautschukmischung unter hohem Druck durch eine Düse in ein geschlossenes, auf Vulkanisationstemperatur erwärmtes *Spritzgießwerkzeug* einspritzt (Abb. 5.2.4-2). Abweichend von der Transferformung erfolgt die Werkzeugfüllung beim Spritzgießen durch eine außerhalb des Werkzeugs befindliche Plastiziereinheit. Bei *Mehrfachwerkzeugen* gelangt die Kautschukmischung durch einen zentralen Angußkanal in die Werkzeughöhlungen. Großvolumige oder dickwandige Formartikel werden durch *Fließgießen*, eine Kombination von Extrudieren und Spritzgießen (auch *Intrusionsspritzgießen* genannt) gefertigt. Die Beschickung von Spritzgießautomaten geschieht gewöhnlich durch Einlauf eines Mischungsbands in den Einfüllschacht der Spritzgießmaschine.

Extrudieren oder *Strangpressen* dient vorrangig der kontinuierlichen Formung massiver und hohler Profile. Es wird mit *Schneckenpressen (Extrudern)* durchgeführt, indem eine Schnecke kontinuierlich die in einem temperierbaren Zylinder plastizierte Kautschukmischung durch eine formgebende Öffnung eines heiz- oder kühlbaren Extruderwerkzeugs (*Spritzkopf*) preßt.

Neben dem in Abb. 5.2.4-3 dargestellten *Einschneckenextruder* gibt es auch *Doppelschneckenextruder* (Tafel 19). *Kaltschneckenpressen (KSP)* sind konstruktiv robuster ausgelegt und erreichen Ausstoßleistungen bis zu 1,5 t/h. Ihre Plastiziereinheiten sind etwa doppelt so lang wie bei *Warmschneckenpressen*, da die zur Verfor-

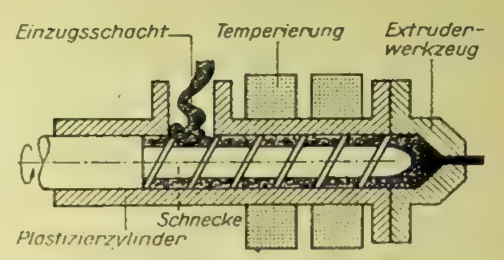


Abb. 5.2.4-3 Einschneckenextruder

mung der Kautschukmischungen erforderliche Viskositätserniedrigung im wesentlichen durch *Scherererwärmung* erreicht wird. Die Materialzuführung erfolgt gewöhnlich als Mischungsband, bei KSP ohne Vorwärmung aus einem Trommelmagazin, seltener als *Granulat*. Mit Schneckenpressen sind Extrudate unterschiedlichster Querschnittsformen herstellbar. Auch flächige Erzeugnisse, wie Bänder und Platten, lassen sich mit Extrudern formen. Mittels Extruderwerkzeug mit Umlenkung (*Querspritzkopf*) werden Schläuche, Drähte (Kabel) ein- oder mehrfach mit Deckschichten ummantelt.

Zum mechanischen Reinigen und Tablettieren von Kautschukmischungen werden Schneckenpressen verwendet, deren Spritzköpfe mit Lochplatten bzw. Schneideeinrichtungen versehen sind. Erstere bezeichnet man als *Strainer*, letztgenannte als *Granulierschneckenpressen* oder *Pelletizer*. Zur verarbeitungsgerechten Formung von Rohmischungen werden *Stempelschneckenpressen* als Verkettungseinrichtungen eingesetzt.

Kalandrieren wendet man zur Formung von Platten und Profilen, zum Belegen von Textil- und Stahlkorden mit Kautschukmischungen sowie zum Dublieren von Platten und gummierten Geweben an (vgl. 5.1.2.).

Kalanderfließstrecken sind automatisierte Produktionsanlagen, die mit universell einsetzbaren *Drei-* und *Vierwalzenkalandern* sowie mit speziellen Hilfs- und Verkettungseinrichtungen ausgerüstet sind. Man benutzt derartige Anlagen z. B. zur kontinuierlichen Belegung von Reifenkorden oder zum Dublieren von Reifenaufbauelementen (Abb. 5.2.4-4).

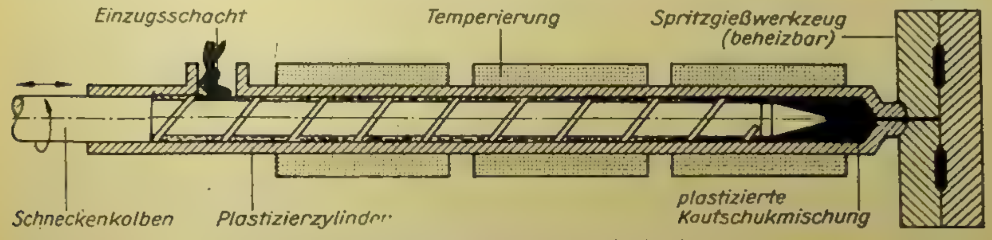


Abb. 5.2.4-2 Verarbeitung von Kautschukmischungen durch Spritzgießen

Blähen. Gummihohlkörper, wie z. B. Spielbälle, technische Blasen, selbsttragende Kinderwagenreifen u. a., werden vielfach in der Weise hergestellt, daß der in das Werkzeug eingelegte vorgeformte Rohling durch Gasbildung aufgebläht und somit während der Vernetzung von innen gegen die Werkzeugkontur gepreßt wird. Die Gasatmosphäre erzeugt man durch den thermischen Zerfall eines Treibmittels, das man in Tablettenform in das Innere des Rohlings einlegt.

Konfektionieren ist das formgebende Zusammenfügen eines Gummiartikels aus vorgefertigten Aufbauelementen. Diese können aus verschiedenen Kautschukmischungen o. a. textilen oder metallischen Gegenwerkstoffen bestehen. Typische Konfektionierartikel sind z. B. alle Kfz-Luftreifen. Die für den Aufbau notwendigen Verbindungen der einzelnen Elemente entstehen durch die hohe Eigenklebrigkeit der Kautschukmischungen und gegebenenfalls durch vorheriges Einstreichen mit Kautschuklösungen. Durch das Konfektionieren bedingte Schnitt- und Haftflächen fließen durch Erwärmung beim Vulkanisieren zusammen und verschweißen fest. Auch *Fördergurte*, mit Festigkeitsträgern verstärkte *Riemen* und *Schläuche*, *Gummistiefeln* u. a. Artikel werden durch Konfektionieren aufgebaut.

Tauchen, Gießen, Spritzen. Zur Fertigung sehr dünnwandiger, hohler, aber auch massiver oder aus zelligem Material bestehender Gummiwaren setzt man Kautschukmischungen auch in flüssiger Form als Lösungen oder Dispersionen (*Latexmischungen*) ein. Die sich daraus ableitenden Formgebungsverfahren erlauben mit einem verhältnismäßig geringen Aufwand an technischen Mitteln die Fertigung nahtloser Gummierzeugnisse einfacher und komplizierter Gestalt. *Lösungen* werden durch Auflösen von Festkautschukmischungen in Benzin im Verhältnis ≈ 1:5 hergestellt. *Latexmischungen* sind wäßrige Kautschukmischungen, die man durch Einrühren speziell aufbereiteter Füll- und Farbstoffe sowie Weichmacher und Vulkanisationsmittel in stabilisiertem natürlichem oder synthetischem Latex erhält.

Tauchen. Positivmodelle aus Glas, Metall, Keramik u. a. werden ein- oder mehrmalig kurzzeitig in Kautschuklösungen oder Latexmischungen getaucht. Der auf dem Tauchwerkzeug verbleibende Film wird beim Lösungstauchen nach dem Verdunsten des Lösungsmittels vulkanisiert. Sehr gleichmäßige Überzüge liefert das Latextauchverfahren, wenn man poröse, mit Koagulationsmittel präparierte Tauchwerkzeuge verwendet. Nach dem Tauchen diffundiert letzteres sofort in den Latexfilm, wodurch dieser sich verfestigt (Koagulant-Verfahren). Auswaschen des Koagulationsmittels und Vulkanisation können gleichzeitig in einem Heißwasserbad erfolgen. Die fertigen Erzeugnisse lassen sich von den Tauchwerkzeugen abstreifen. Durch Tauchen werden Sauger, Blasen, Gummihandschuhe, Badehauben, Ballons u. a. gefertigt.

Gießen. Die Dispersionen werden in die Höhlungen der Gießwerkzeuge gegossen und der Kautschuk durch Erwärmung koaguliert. Bei Benutzung gummischädlicher Koagulationsmittel wird das Koagulat gewaschen, getrocknet und dann vulkanisiert. Auf diese Weise stellt man Gummitiere, Gummischuhe, Campingartikel u. a. Erzeugnisse her. Durch Einblasen von Luft oder Zugabe chemisch wirkender Treibmittel entstehen aus vergossenen Dispersionen Schaumgummierzeugnisse, wie Sitze, Matten, Matratzen.

Spritzen. Zur Herstellung von *Gummifäden* wird die schwach basische Dispersion aus einer Düse zum Koagulieren in ein saures Fällbad gedrückt. Die Entfernung der Säure im Wasserbad, Trocknung, Vulkanisation und Aufwicklung erfolgen, wie das Ausfließen, kontinuierlich. Der größte Teil der in der Textilindustrie benötigten Gummifäden wird nach diesem Formgebungsverfahren hergestellt.

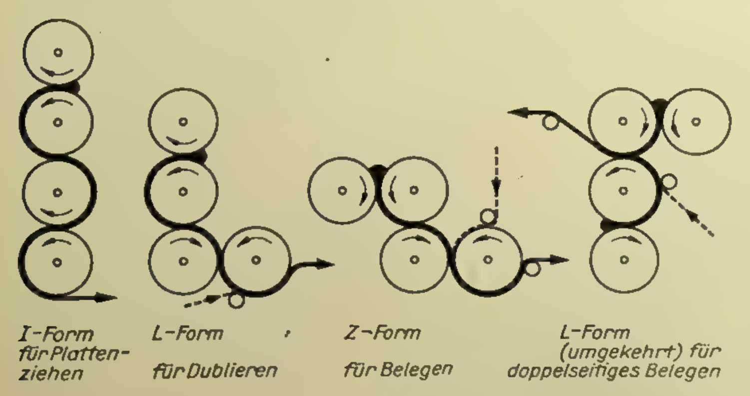


Abb. 5.2.4-4 Gebräuchlichste Walzenanordnungen bei Vierwalzenkalandern

Sieht man von der mechanischen Endbearbeitung eines Gummierzeugnisses, wie Entgraten, Ausrüsten mit Armaturen, Bedrucken usw., ab, so beendet die Vulkanisation den fertigungstechnologischen Hauptprozeß der Gummiwaren. Geometrische und stoffliche Besonderheiten der Erzeugnisse sowie die steigenden Anforderungen an Qualität und Menge haben zu unterschiedlichen Vulkanisier- und Vernetzungsverfahren mit speziellen Vulkanisiereinrichtungen geführt. Je nachdem, ob das vorgefertigte Halbzeug bis zur Vulkanisation seine endgültige Formgebung erhalten hat oder nicht, unterscheidet man 2 Arten von Vernetzungseinrichtungen.

Vernetzungseinrichtungen ohne Formgebung. In ***Druckgefäßen*** *(Autoklaven)* können frei heizbare, nicht von Werkzeugen umgebene Rohlinge, wie z. B. auf Dorne aufgezogene Schläuche, gummibelegte Stahlfelgen, Gummistiefel u. a., vulkanisiert werden. Bei nicht feuchteempfindlichen Mischungen erfolgt die Wärmeübertragung direkt durch eine Sattdampfatmosphäre im Kesselinneren, andernfalls indirekt durch erhitzte Luft mit *Universalkesseln* (Abb. 5.2.5-1). Horizontal gelagerte Druckgefäße werden mit fahrbaren Regal- oder Hordenwagen, vertikal stehende unter Verwendung von Hebevorrich-

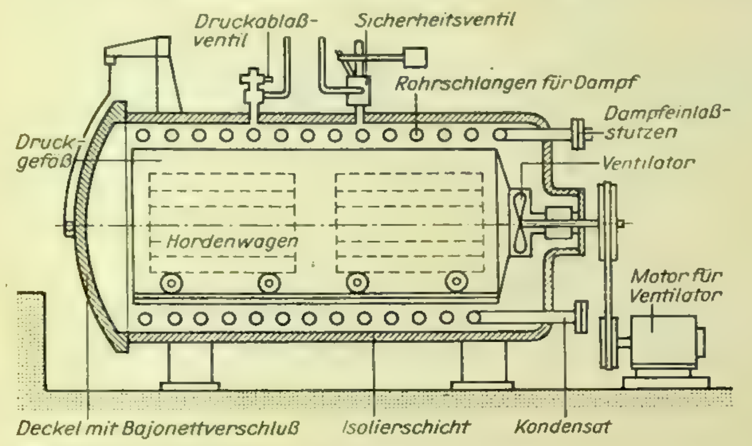


Abb. 5.2.5-1 Universalkessel mit indirekter Beheizung

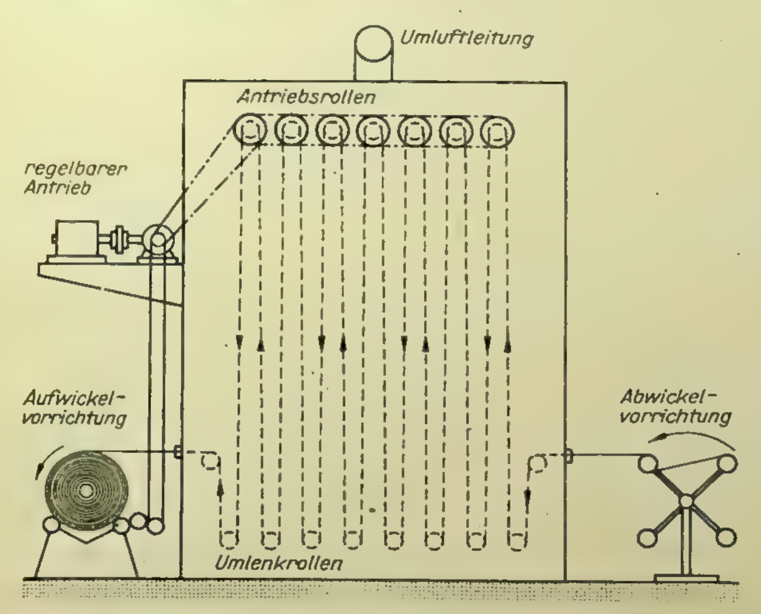


Abb. 5.2.5-2 Vulkanisierschrank mit Beschickungseinrichtung

tungen von oben beschickt. Für eine gleichmäßige Wärmeübertragung sorgt eine Luftumwälzung. Vulkanisieranlagen mit Druckgefäßen arbeiten diskontinuierlich.

Vulkanisierschränke benutzt man vor allem für die Vulkanisation von Tauchartikeln, die auf Regalwagen liegend oder hängend von der in das Schrankinnere eintretenden Heißluft möglichst gleichmäßig umströmt werden. Vulkanisier- oder Heizschränke mit speziellen Beschickungseinrichtungen werden auch zur drucklosen kontinuierlichen Vulkanisation beschichteter Gewebe verwendet (Abb. 5.2.5-2).

Vulkanisierbäder setzt man zur kontinuierlichen Vulkanisation von Massiv- und Hohlprofilen ein. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Wärmeübertragung durch ein flüssiges Medium (heißes Wasser, Salz- oder Metallschmelze), das vom Extrudat durchlaufen wird. Die notwendige Verweilzeit des Profils im Bad wird durch entsprechende Einstellung der Durchlaufgeschwindigkeit gewährleistet. Große Mengen von Luftschläuchen für Fahrräder, Mopeds und Kleinfahrzeuge werden so durch Ablängen und Zusammenstoßen eines Rohschlauches, der in beliebiger Länge vulkanisiert wird, gefertigt.

Das *Wirbelbettverfahren* benutzt als Wärmeübertrager auf Vulkanisationstemperatur aufgeheizte, ≈ 1 mm große Glaskügelchen, die durch einen Heißluftstrom aufgewirbelt das austretende Extrudat treffen. Dieses Verfahren schließt schädigende Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Heizmedium mit Sicherheit aus, ist jedoch energetisch unvorteilhaft.

Vulkanisiertunnel sind vom technologischen Prinzip her mit Badanlagen vergleichbar, in denen das Heizbad durch einen beheizten Tunnel ersetzt ist. Die Übertragung der Vernetzungsenergie kann bei diesen Anlagen durch Wärmestrahlung (IR-Strahlung), hochfrequente elektrische Wechselfelder (HF- oder UHF-Felder) oder energiereiche (radioaktive) Strahlung erfolgen. Diese Einrichtungen erlauben gegenüber Bädern auch eine vertikale Arbeitsweise.

Vernetzungseinrichtungen mit Formgebung. Hierzu zählen Pressen verschiedener Bauart und Spritzgießmaschinen (vgl. 5.2.4.). Die Verfahrensbeschreibungen gehen bereits auf das Formgeben bei gleichzeitiger Vernetzung ein.

Trommelvulkanisiermaschinen werden zur Vernetzung langer, aus reiner Kautschukmischung bestehender Bahnen (Fußbodenbelag) sowie dünner textilverstärkter Fördergurte angewendet. Die in einem bestimmten Umschlingungswinkel um die auf Vulkanisationstemperatur erwärmte Vulkanisiertrommel laufende Mischungsbahn wird durch ein Stahlband auf die Trommeloberfläche gepreßt. Es lassen sich so beliebig lange, glatte oder oberflächenprofilierte Gummibahnen herstellen.

5.2.6. Einsatzgebiet elastomerer Werkstoffe

Im Gegensatz zu der fortschreitenden Substitution herkömmlicher Werkstoffe durch Plaste sind die Einsatzgebiete der Elaste relativ stark begrenzt. Gummi hat sich überall dort eingeführt, wo seine stoffspezifischen Eigenschaften, wie *Hochelastizität*, *Flexibilität*, *Weichheit*, hohe *dynamische Ermüdungsbeständigkeit* u. a., maßgeblich über Funktionstüchtigkeit und Gebrauchswert des Erzeugnisses entscheiden. Oft sind diese Merkmale mit einem Preisvorteil und geringerem Wartungsaufwand gegenüber anderen Werkstoffen verbunden. Die nahezu unübersehbare Vielzahl von einigen hunderttausend Elasterzeugnissen läßt sich aus der Sicht der unterschiedlichen Formen und ihrer konstruktiven Gestaltung in folgende hauptsächliche Erzeugnisgruppen unterteilen: Dichtungen und Profile, technische Platten, Gummifeder- und Kupplungselemente, Fördergurte, Treibriemen, technische Schläuche, Kfz-Reifen, Tauchartikel, zellige Gummiwaren. Mit Ausnahme der vielfach aus homogenen Kautschukmischungen aufgebauten Platten, Dichtungselemente, zelligen Gummiwaren und Tauchartikel stellen die übrigen Erzeugnisse meist sog. *Verbundsysteme* dar. Man versteht darunter die durch Vulkanisation herbeigeführte Verbindung einer Kautschukmischung mit einem oder mehreren anderen metallischen oder nichtmetallischen (Textil, Glasfaser) Gegenwerkstoffen. Unterschiedliche *Haftsysteme*, wie Hartgummischichten, synthetische Harze, Polyisocyanate u. a., verbessern die Haftung erheblich oder erzeugen überhaupt erst eine ausreichende Verbindung zwischen Gegenwerkstoff und Gummi. Heterogene Verbunde vereinigen in sich die hervorragenden Elastizitätseigenschaften des Gummis mit den hohen Modulwerten der Festigkeitsträger.

5.2.7. Gummi als Sekundärrohstoff

Der Einsatz von Gummi als Sekundärrohstoff umfaßt die Wieder- oder Weiterverwertung von *Alt-* und *Abfallvulkanisaten*. Letztere entstehen zwangsläufig bei der Fertigung von Gummierzeugnissen im Produktionsbetrieb als Austriebe, Angüsse, als Reste beim Entgraten und Beschneiden von Formartikeln und Platten oder als Abfälle von Stanzartikeln. Derzeitig werden im Weltmaßstab jährlich mindestens 20 Mio t Gummierzeugnisse produziert, die mit dem Verlust ihrer Funktionstüchtigkeit in den nächsten Jahren als Altstoffe in Industrie und Wirtschaft anfallen. Davon erreichen allein Kfz-Reifen nahezu 11 Mio t/Jahr.

Gegenwärtig beschränkt sich die Nutzung der ständig zunehmenden Altgummibestände auf einen nur kleinen Anteil von ≈ 5% bezogen auf

den Frischkautschukeinsatz. In der kautschukverarbeitenden Industrie werden Alt- und Abfallvulkanisate als Mahlgut oder Kautschukregenerat in Frischkautschukmischungen eingesetzt. *Gummimahlgut* wird durch mechanische Vorzerkleinerung und Feinmahlung von Altgummi möglichst gleichmäßiger Zusammensetzung (Reifen, sortierte technische Abfälle) erhalten. *Kautschukregenerate* stellen aus Alt- oder Abfallvulkanisaten gewinnbare plastische Depolymerisate dar, die man heute meist durch chemisch-oxydativen Abbau von gemahlenem Gummi in Autoklaven oder durch thermomechanische Regenerierung mit Hilfe von Schneckenpressen (*Reclaimatoren*), herstellt. Zur Homogenisierung der Regenerate finden Spezialwalzwerke (Refinerwalzwerke) Anwendung. Bei vielen Erzeugnissen läßt sich Frischkautschuk anteilig durch Regenerat ersetzen, in manchen Fällen genügen reine Regeneratmischungen den Anforderungen an die Vulkanisate. Neben bestimmten technischen Vorteilen ermöglicht der Regenerateinsatz oft eine merkliche Verbesserung des Mischungspreises. In anderen Bereichen von Industrie und Wirtschaft findet Gummimahlgut als Zuschlagstoff für *bituminöse Vergußmassen*, *Isolieranstriche* und *Bautenschutzstoffe* Verwendung. *Regeneratdispersionen* sind als preiswerte Klebemittel verwertbar. Kautschukarme Alt- und Abfallvulkanisate arbeitet man zu Gummikleinteilen (Unterlagen, Platten, Keile, Fußabstreicherstollen u. ä.) sowie zu *Gummischroten* auf, die als wärme- und trittschallisolierende Dämmstoffe verwendet werden. Zur Beseitigung großer Altreifenmengen wurden betonbelastete Reifenpyramiden als künstliche Labyrinthe zur Begünstigung der Fischaufzucht auf Meeresböden abgesetzt.

Die Inbetriebnahme großtechnischer *Reifenverwertungsanlagen* führte zur Gewinnung von Energie und *Pyrolyseprodukten*, wie H_2, CO, CO_2, Styrol, Butadien, Isopren, Öle, Ruße u. a. Der jährliche Anfall an Altreifen entspricht einem Energievorrat von 25 bis 30 Mio t Steinkohle. Der Wert der durch Reifenverbrennung gewinnbaren Energie steht jedoch in einem sehr ungünstigen Verhältnis zum ursprünglichen Materialwert

6. Silikattechnik

Als Silikattechnik bezeichnet man die Technik zur Herstellung von Keramik, Glas, Email und Bindemitteln, die überwiegend Silikate sind. Die Technik zur Herstellung silikatischer Werkstoffe wurde auch auf andere anorganische, nichtmetallische Stoffe (Oxide, Carbide, Nitride und Boride) übertragen, so daß man heute die Silikattechnik auch als Technik zur Herstellung anorganischer, nichtmetallischer Werkstoffe bezeichnen kann. Diese Werkstoffe besitzen als Baustoffe, Sanitärkeramik, Fensterglas, als feuerfeste Materialien für die Metallurgie, als Bauelemente für die Elektrotechnik/Elektronik und Optik, im Haushalt und in vielen anderen Zweigen eine große und zunehmende Bedeutung. Es können überwiegend einheimische mineralische Rohstoffe, wie Ton, Kaolin, Sand, Kalkstein u. a., eingesetzt werden.
Keramische Erzeugnisse werden hergestellt, indem ein sinterfähiges Pulver zu einem Gegenstand geformt und dann einem Hochtemperaturprozeß (Sintern) unterworfen wird, bei dem die Werkstoffeigenschaften ausgeprägt werden. Keramische Werkstoffe sind vollständig oder überwiegend kristallin. Bei der Glasherstellung wird durch Schmelzen des Gemenges (Rohstoffmischung) der Werkstoff gebildet. Die Formung der Erzeugnisse erfolgt aus der Schmelze. Gläser sind amorphe Werkstoffe. Emails sind glasartige Überzüge auf Metallen. Beim Aufschmelzprozeß erfolgt eine Haftung zwischen Email und Metall. Die Herstellung von Bindemitteln, z. B. Portlandzement (vgl. 6.1.4.), beruht darauf, daß die Rohstoffmischungen durch einen Hochtemperaturprozeß so umgewandelt werden, daß ein Produkt entsteht, das nach dem Mahlen und der Zugabe von Wasser erhärtet. Es wird deutlich, daß der Hochtemperaturprozeß, das *Sintern* oder *Schmelzen*, der dominierende Prozeß ist und die Vorbereitung der Rohstoffe und die Formgebung günstige Bedingungen für die Gestaltung dieser Prozesse schaffen.

6.1. Bindemittel

Anorganische *Bindemittel* sind pulverförmige Stoffe, die beim *Anmachen* mit Wasser und festen Zuschlagstoffen einen Mörtel bilden, der zunächst formbar ist und nach einer gewissen Zeit steinartig erhärtet. Mörtel sind breiige oder knetbare Gemische aus Bindemittel, Wasser und festen Zuschlagstoffen. Die Erhärtung und Festigkeit der Mörtel werden durch das Bindemittel verursacht. Auch die Verformbarkeit der nichterhärteten Mörtel wird durch das Bindemittel verbessert. Die wichtigsten Bindemittel sind Zemente, Kalke und Gipse. In anderen Ländern wird der Begriff Bindemittel oft in einem weiteren Sinn verwendet. Dann unterscheidet man mineralische und organische Bindemittel. Die Bindemittel können nach ihrer *Temperaturbehandlung bei der Herstellung* eingeteilt werden in:

– in natürlicher Form verwendete, ungebrannte: Lehm, Ton,
– bis zur Entwässerung gebrannte: Gips,
– bis zur Entsäuerung gebrannte: Kalk, Magnesia,
– bis zur Sinterung gebrannte: Zement,
– bis zur Schmelze gebrannte: Schmelzzement.

Nach der *Art der Erhärtung* unterscheidet man:

– *an der Luft erhärtende Bindemittel* oder *Luftmörtelbildner* mit selbständiger Erhärtung (Lehm, Gips) und unselbständiger Erhärtung (Luftkalk),
– *hydraulisch erhärtende Bindemittel*: hydraulischer Kalk, Zement.

Nichthydraulische Bindemittel erhärten selbständig durch eine Austrocknung, z. B. Lehm, oder durch eine chemische Reaktion des Bindemittels mit dem Anmachwasser, z. B. Gips. Sie erhärten unselbständig, wenn zu den Mörtelbestandteilen eine weitere Komponente von außen hinzukommen muß, damit eine Verfestigung eintritt, wie das CO_2 der Luft zu den Luftkalken. Verfestigte nichthydraulische Bindemittel sind gegen Wasser nicht dauerbeständig.
Hydraulische Bindemittel erhärten an der Luft und unter Wasser und bilden dabei mit Wasser gegen den Angriff des Wassers beständige Verbindungen. *Latenthydraulische Stoffe* benötigen zur Verfestigung einen Anreger, z. B.

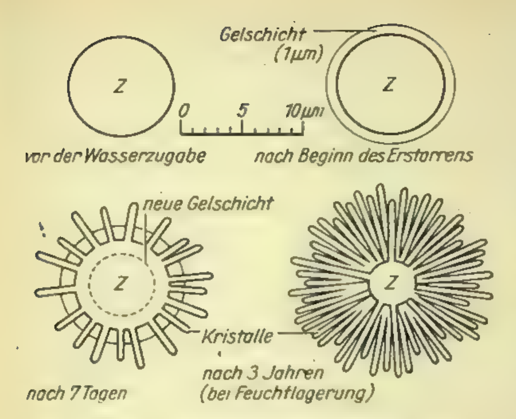


Abb. 6.1.0-1 *Zementerhärtung (schematische, stark abstrahierte Darstellung nach Grün; Z = Zement)*

Portlandzement, Kalk, Gips. Die spezifische Eigenart der hydraulischen Erhärtung besitzen oxidische Verbindungen der Erdalkalien mit den Metallen der 4. Gruppe des Periodensystems der Elemente. Technische Bedeutung als hydraulische Bindemittel haben die Verbindungen des CaO mit SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3, die sog. *Hydraulefaktoren*. Die Erhärtung der hydraulischen Bindemittel ist ein komplizierter Prozeß, der über Lösungs-, Hydrolyse-, Hydratations- und Kristallisationsvorgänge läuft, wobei die Neubildungen Eigenschaften von Gelen aufweisen und teilweise topochemisch gebildet werden (Abb. 6.1.0-1).
Die Bindemittel sind Halbfabrikate und zählen zur materiellen Basis des Bauwesens. Die Bindemittelwerke gehören zur silikattechnischen Industrie. Die Rohstoffe werden meist aus natürlichen Lagerstätten bergmännisch gewonnen, können aber auch als Abfallprodukte anderer Industriezweige anfallen, z. B. die Hochofenschlacke. Die Aufbereitung setzt sich aus der Zerkleinerung, Klassierung und Mischung zusammen. Bei speziellen Verfahren können einzelne technologische Schritte entfallen. Die Tab. 6.1.0-2 enthält notwendige Aufwendungen zur Produktion der Bindemittel. Die Weltjahresproduktion an Bindemitteln beträgt $\approx 10^9$ t.

Tab. 6.1.0-2 *Rohstoff- und Energieaufwendungen je Tonne Bindemittel*

Bindemittel	Rohstoffe in t	Wärmeenergie in MJ theoretisch	Wärmeenergie in MJ praktisch	Elektroenergie in MJ
Portlandzement	1,6	1800	4000	400
Branntkalk	1,8	3000	4000	100
Branntgips	1,3	700	1500	100

6.1.1. Gips

Gips wird durch teilweise oder vollständige Entwässerung von Rohgips (Gipsstein), der überwiegend aus $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ besteht, im Brennprozeß hergestellt und als *Branntgips* bezeichnet. Das natürlich vorkommende Rohgipsgestein oder der als Abfallprodukt der chemischen Industrie anfallende Chemierohgips werden entweder bei Temperaturen von 100 bis 200 °C zu *Halbhydratgips* ($CaSO_4 \cdot {}^1/_2H_2O$) oder bei 600 bis 900 °C zu *wasserfreiem Gips* ($CaSO_4$) gebrannt.
Der gebrannte und feingemahlene Gips reagiert nach dem Anrühren mit Wasser zu $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Dabei entsteht eine Vielzahl kleiner Kalziumsulfatdihydratkristalle, die sich vernetzen, gegenseitig abstützen und sich so verfestigen. Theoretisch sind für die Erhärtung der Halbhydratgipse 18,6 % Wasser erforderlich. Um einen verarbeitbaren, breiigen Mörtel zu erhalten, werden praktisch 40 bis 70 % Wasser zugegeben. Da das chemisch nicht gebundene Wasser aus dem verfestigten Dihydrat austrocknet, besitzen die verfestigten Gipsmörtel eine hohe Porosität von 30 bis 60 %. Dadurch weisen sie ein starkes Saug-, Schall- und Wärmedämmvermögen auf. Durch Füllstoffe o. a. Maßnahmen zur Erhöhung der Porosität lassen sich vorzügliche Isolationswirkungen, allerdings auf Kosten der Festigkeit, erzielen. Die Druckfestigkeit erhärteter Gipsmörtel beträgt bis 20 MPa.
Die Eigenschaften der verschiedenen Branntgipse werden bevorzugt durch unterschiedliche Anteile der Verbindungen des Systems $CaSO_4$–H_2O bestimmt. Eine Steuerung der Eigenschaften kann durch Zusätze erfolgen, die vor allem als Verzögerer oder Beschleuniger des Abbindens und als Verdicker oder Verflüssiger der Gipsmörtel wirken. Erhärtete Gipsmörtel

Tab. 6.1.1-1 *Branntgipssorten und ihre Anwendung*

Sorte	Anwendung
Baugipse	
Stuckgips	Gipsbauelemente, Isolierungen der Wärme- und Kältetechnik, Stuckarbeiten
Putzgips	Putz- und Stuckarbeiten
technische Gipse	
Modellgips	Stuck- und Bildhauerarbeiten, Formen und Modelle der Keramik und Metallurgie, Gipsbauelemente
Hartformgips	Formen der Keramik und Metallurgie, Isolatorenkitte
Alaungipsbinder	Kunstmarmor, Fugenfüllmasse bei Fliesen
totgebrannter Gips	Füllstoff für Papier, Leim und Kitt, Farbstoffträger
medizinische Gipse	Verband- und Dentalgipse

sind nicht wasserbeständig. Ein Schutz gegen Feuchtigkeit läßt sich durch Anstriche oder Zusätze erreichen (Tab. 6.1.1-1).
Ein dem Gips ähnliches Bindemittel ist der *Anhydrit* $CaSO_4$. Anhydrit zeigt an sich keine Neigung, mit Wasser zu reagieren und sich wie die Branntgipse zu verfestigen. Unter bestimmten Bedingungen gelingt es, die Löslichkeit des Anhydrits zu erhöhen, so daß eine Erhärtung unter Bildung von Dihydrat wie bei den Branntgipsen ablaufen kann. Natürlicher Anhydrit oder Chemierohanhydrit erlangt durch Feinmahlung und Zusatz von 2 bis 7% Anregern Bindemitteleigenschaften. Als Anreger dienen Sulfate, Kalk, Magnesia, Zemente oder basische Schlacken. Da zur Produktion von Anhydritbindemitteln kein Brennprozeß erforderlich ist, wird wenig Energie verbraucht.

6.1.2. Kalk

Kalk wird aus den natürlichen Rohstoffen Kalkstein, Dolomit und Mergel oder aus dem Abfallprodukt der Äthinerzeugung Karbidkalkhydrat durch Brennen unterhalb der Sintergrenze hergestellt. *Kalkstein* besteht überwiegend aus dem Mineral Kalzit $CaCO_3$, *Dolomit* aus der Verbindung $CaMg(CO_3)_2$. *Mergel* ist ein Gemisch aus Kalkstein und Ton und enthält neben $CaCO_3$ die Verbindungen SiO_2 und Al_2O_3. *Branntkalk* besteht überwiegend aus CaO. *Kalkhydrat* oder *Löschkalk* ist ein durch Zugabe von Wasser hydratisierter Kalk mit $Ca(OH)_2$ als Hauptbestandteil. Die natürlichen Rohstoffe werden bergmännisch als Karbonate meist in einem Tagebau gewonnen (Tafel 20), zerkleinert und teilweise von unerwünschten Beimengungen befreit. Die Zerkleinerung erfolgt bis auf eine Korngröße im cm-Bereich mit Backen- oder Kegelbrechern (vgl. 1.6.1.).
Das *Kalkbrennen* geschieht bei Temperaturen von 1000 bis 1300 °C. Bei einer Temperatur > 900 °C zerfällt Kalkstein in CaO und CO_2. Durch das entweichende CO_2 entsteht ein Masseverlust von ≈ 40 %, der Poren im Branntkalk verursacht. Mit steigender Brenntemperatur setzt eine Sinterung des Branntkalkes ein, die die Porosität verringert. Besteht das Brennprodukt überwiegend aus CaO und MgO, so heißt das nichthydraulische Bindemittel *Luftkalk*. Im Mergel reagiert der Tonanteil mit einem Teil des $CaCO_3$ bei Temperaturen > 600 °C zu den Verbindungen $2CaO \cdot SiO_2$, $3CaO \cdot Al_2O_3$ und $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$. Diese Verbindungen verleihen dem Bindemittel hydraulische Eigenschaften. Dieser *hydraulische Kalk* enthält außerdem freies CaO.
Das Kalkbrennen erfolgt in Schacht-, Drehrohr- oder Spezialöfen. Das übliche Brennaggregat ist

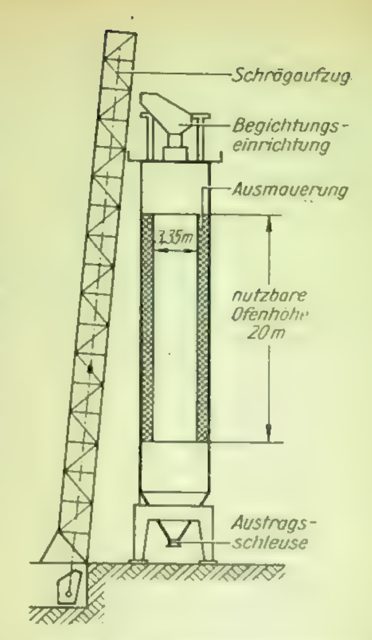


Abb. 6.1.2-1 *Kalkschachtofen mit einer Leistung von 100 t/Tag gebranntem Kalk*

der *Schachtofen* (Abb. 6.1.2-1). Im Schachtofen verbrennt der feste, flüssige oder gasförmige Brennstoff auf halber Höhe des Ofenschachts, wobei Temperaturen von 1000 bis 1300 °C entstehen. Die heißen Abgase strömen nach oben und erwärmen den kalten Kalkstein. Der heiße Branntkalk gibt im unteren Teil des Ofens die Wärme an die kalte Verbrennungsluft ab. Der Schachtofen ist so ein ausgezeichneter Wärmetauscher und nutzt die Brennstoffwärme bis zu 90% aus. Der Ofen wird oben beschickt und unten entleert, wobei der Transport durch die Schwerkraft erfolgt und keine mechanischen Fördereinrichtungen im Ofen erfordert. Der tägliche Durchsatz eines Schachtofens beträgt bis zu 600 t Branntkalk, der als *Stückkalk* bzw. nach dem Mahlen als *Feinkalk* bezeichnet wird.
Für die Verwendung als Bindemittel muß der Branntkalk durch Zugabe von Wasser gelöscht werden ($CaO + H_2O \rightarrow Ca[OH]_2$). Beim Naßlöschen mit Wasserüberschuß entsteht Kalkmilch oder -brei. Beim Trockenlöschen erhält man ein Kalkhydratpulver. Die Löschreaktion ist stark exotherm und führt zu einer Volumenverdoppelung. Wenn Baukalkhydrate ungelöschte CaO-Anteile enthalten, hydratisiert das freie CaO im erhärteten Baustoff, der die Volumenvergrößerung nicht aufzunehmen vermag, so daß Bauschäden als Abplatzungen und Risse entstehen.
Die Verfestigung der Mörtel beginnt mit einem Wasserentzug durch die porösen und trockenen Baustoffe Ziegel oder Beton. Die Erhärtung der

Luftkalkmörtel beruht auf einer CO_2-Aufnahme aus der Luft ($Ca[OH]_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$). Die Festigkeit der Luftkalkmörtel entwickelt sich langsam in Monaten und Jahren und ist gering. Höhere Festigkeiten erreichen hydraulische Kalke mit einer Druckfestigkeit bis zu 10 MPa, weil sie sich neben der Karbonaterhärtung zusätzlich hydraulisch verfestigen.

6.1.3. Spezielle nichthydraulische Bindemittel

Bei Montagearbeiten für elektrotechnische Geräte, für säure-, lauge- oder ölbeständige Anlagen, für Abdichtungen, elektrische Isolationen, feuerfeste Auskleidungen oder spezielle Verwendungen im Bauwesen werden oft kleine Mengen an Bindemitteln benötigt, die besonderen Anforderungen entsprechen müssen. Diese Bindemittel enthalten oft *Kali-* oder *Natronwasserglas* und als Zuschlagstoff Quarzmehl, Alumosilikate, Zirkonverbindungen o. a. anorganische Stoffe. Auch Aluminium- und Magnesiumsulfate, -chloride oder -phosphate, Phosphorsäure u. a. Chemikalien sind im Einsatz. Die Druckfestigkeit erreicht einen Wert bis zu 30 MPa. Bekannt ist der *Sorelzement* auf der Basis von kaustisch gebrannter Magnesia, wäßrigen Lösungen von $MgCl_2$ und $MgSO_4$ und Füllstoffen als *Magnesiabindemittel*, das für Steinholzfußböden und Leichtbauplatten verwendet wird. *Schwefelzement* besteht aus Quarzmehl und Schwefel, der beim Erwärmen schmilzt, beim Abkühlen erstarrt und sich so verfestigt.

6.1.4. Zement

Zemente sind hydraulische Bindemittel, die an der Luft und unter Wasser erhärten und die nach der Erhärtung wasserbeständig sind. Die Rohstoffe werden mindestens bis zur Sinterung gebrannt, wobei ein bedeutender Anteil des Brennguts bei hohen Temperaturen schmelzflüssig ist, so daß eine Verdichtung und Verfestigung erfolgt und ein Klinker entsteht. Zemente sind feingemahlene Pulver mit Korngrößen < 0,1 mm und bestehen vorwiegend aus Kalziumsilikaten, -aluminaten und -ferriten.

Portlandzemente sind hydraulische Bindemittel, die durch ein gemeinsames Feinmahlen von Portlandzementklinker und Gips- oder Anhydritgestein oder von Portlandzementklinker, Gips- oder Anhydritgestein und max. 20% Zumahlstoffen hergestellt werden. *Portlandzementklinker* besteht aus hochbasischen Verbindungen von CaO mit SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3 und max. 5% MgO. Er wird durch Brennen bis mindestens zur Sinterung der feingemahlenen und innig gemischten Rohstoffe hergestellt.

Portlandzemente werden für Betone mit einer Druckfestigkeit > 20 MPa verwendet. Sie sollen nicht als Zusatz zu Mauer- und Putzmörtel und nur in Ausnahmen für Leichtbetone eingesetzt werden. Die Sorte PZ 2 wird vorzugsweise im Grund- und Wasserbau, für Asbestzementdruckrohre, Abwasserkanäle und bei Bohrungen auf Erdöl und Erdgas angewendet. Wegen seines mineralogischen Aufbaus ist er beständig gegen den Angriff sulfathaltiger Wässer. Die Sorte PZ 3 eignet sich besonders im Straßenbau für Fahrbahndecken und für die Vorfertigung von Betonelementen mit Warmbeton. Portlandzement entwickelt beim Erhärten eine beachtliche Wärmemenge, erreicht rasch eine hohe Festigkeit und ist gut verarbeitbar.

Zemente mit Zumahlstoffen sind hydraulische Bindemittel, die durch ein gemeinsames Feinmahlen von Portlandzementklinker, Gips- oder Anhydritgestein, bei Hüttenzementen auch Chemierohanhydrit, und > 20% Zumahlstoffen hergestellt werden. *Zumahlstoffe* sind natürliche oder künstliche, mineralische oder glasig erstarrte Stoffe, die gemeinsam mit dem Portlandzementklinker gemahlen oder dem feingemahlenen Klinker im feingemahlenen Zustand zugegeben werden. Der Ersatz des teuren Klinkers durch die Zumahlstoffe bringt ökonomische und energetische Vorteile.

Zemente mit Zumahlstoffen erhärten langsamer als Portlandzement und entwickeln deshalb in der gleichen Zeit weniger Wärme. Sie werden für Betone mit einer Druckfestigkeit < 20 MPa und für Mauer- und Putzmörtel verwendet. Die Sorte ZZ 4, der frühere *Hochofenzement*, wird vorzugsweise für Betone im Grund-, Wasser- und Massenbau eingesetzt, weil er eine geringe Wärme bei der Erhärtung entwickelt und eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen den Angriff von sulfathaltigen Wässern besitzt. *Puzzolanzement* wird mit Steinkohlen- oder Braunkohlenaschen als Zumahlstoff hergestellt und hat Eigenschaften, die den Hüttenzementen ähnlich sind.

Spezialzemente werden neben den Normzementen im geringen Umfang erzeugt. Für Architekturzwecke wird weißer und farbiger Zement angewendet. Der übliche Zement ist durch Eisen grau gefärbt. Zur Produktion der *Farbzemente* müssen deshalb die Rohstoffe eisenfrei sein und in der Technologie alle störenden Verunreinigungen beim Aufbereitungs-, Brenn- und Mahlprozeß vermieden werden. Die Farben des Zements erhält man durch Zumischen von Farbkörpern zum weißen Zement.

Frühhochfester Zement erhärtet rasch, so daß er nach einem Tag eine Druckfestigkeit von 10 MPa und nach 3 Tagen von 30 MPa erreicht. Diese Eigenschaft erhält ein üblicher Portlandzement, wenn seine Zusammensetzung entsprechend gewählt und seine Mahlfeinheit erhöht wurde.

Quellzement wird durch treibende Zusätze hergestellt, die sein Volumen bei der Erhärtung bis zu 3% vergrößern. Daneben gibt es einen schwindfreien Zement mit einer Quellung von 0,3%.

In den *Bariumzementen* ist CaO durch BaO und in den *Strontiumzementen* durch SrO ersetzt. Die Strontiumzemente sind außerordentlich sulfatbeständig. Bariumzement eignet sich als Bindemittel für Feuerbetone, da die Bariumsilikate und -aluminate bei höheren Temperaturen als die entsprechenden Kalziumverbindungen schmelzen.

Ferrarizement enthält die Stoffe Al_2O_3 und Fe_2O_3 im Verhältnis ihrer Molmassen. Er hat eine Reihe vorzüglicher Eigenschaften und wird als *Universalzement* bezeichnet.

Tonerdezement enthält Silikate als Verunreinigung und besteht aus den Kalziumaluminaten $CaO \cdot Al_2O_3$ und $CaO \cdot 2Al_2O_3$. Er wird aus Kalkstein, Kreide oder Branntkalk und Bauxit durch Sinterung oder Schmelzen hergestellt. Er ist ein Spezialzement für feuerfeste Betone und wird im Bauwesen kaum angewendet, obwohl er eine hervorragende Frühhochfestigkeit entwickelt, äußerst beständig gegen Sulfat-, Seewasser- und Moorwasserangriff und unempfindlich gegen niedrige Temperaturen bei der Erhärtung ist, jedoch in Einzelfällen seine Festigkeit nach Jahren oder Jahrzehnten einbüßt.

Die Festigkeitsklassen in der Tab. 6.1.4-1 entsprechen dem Zahlenwert der in der Standardprüfung erhaltenen Druckfestigkeit in kp/cm^2

Tab. 6.1.4-1 *Zementarten und -bezeichnungen*

Zementart	Kurzzeichen	Festigkeitsklasse	Zumahlstoffmenge
Portlandzement	PZ 1	375, 425, 475	keine
sulfatbeständiger Portlandzement	PZ 2	325, 375	keine
Portlandzement mit mittlerer Sulfatbeständigkeit	PZ 3	375	keine
Portlandzement mit Zumahlstoffen	PZ 7	375	max. 20%
Portlandzement mit Zumahlstoffen, nicht für Warmbehandlung	PZ 8	375	max 20%
Hüttenzement 1	ZZ 1	275	21...40%
Hüttenzement 2, nicht für Warmbehandlung	ZZ 2	275	21...40%
Hüttenzement 3	ZZ 3	275	> 40%
Hüttenzement mit mittlerer Sulfatbeständigkeit	ZZ 4	275	>55% granulierte Hochofenschlacke
Puzzolanzement	ZZ 8	275	30...60%

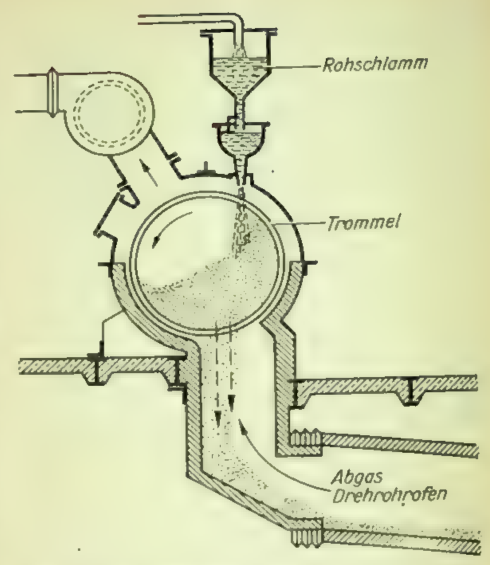


Abb. 6.1.4-2 Kalzinator zum Vortrocknen des Rohschlamms bei der Zementherstellung

nach einer Erhärtungszeit von 28 Tagen. Sie wird vor allem durch die Zusammensetzung und die Mahlfeinheit beeinflußt. Nach einer längeren Lagerung als 1,5 bis 3 Monate wird die Festigkeitsklasse vom Hersteller nicht mehr garantiert.

Portlandzementerzeugung. Sie erfolgt nach 3 unterschiedlichen Verfahren. Beim ältesten Verfahren, dem Naßverfahren, werden die Rohstoffe naß aufbereitet und als Schlamm in den Ofen gegeben. Beim Halbtrockenverfahren werden die Rohstoffe trocken gemahlen, durch Wasserzusatz granuliert und als Granalien gebrannt. Schließlich wird beim jüngsten Verfahren, dem Trockenverfahren, ein trockenes Rohmehl feingemahlen und dem Ofen ohne Wasserzugabe aufgegeben. Bei den einzelnen Verfahren unterscheiden sich die Rohstoffgewinnung, die Vorgänge bei hohen Temperaturen, die Zementmahlung, die Endprodukte und der Versand nicht.

Aufbereitung der Rohstoffe. Kalkstein ist die Hauptrohstoffkomponente für die Erzeugung von Portlandzement. Er wird bergmännisch im Tagebau durch Bohren und Sprengen gewonnen. Unerwünscht sind dolomitische Anteile im Kalkstein. Dagegen sind Beimengungen von Ton im Kalkstein notwendig. Ein idealer Rohstoff ist ein Mergel mit einem $CaCO_3$-Anteil von 75% und einem Tonanteil von 25%. Auch Kreide oder Abfallkalk der chemischen Industrie sind als $CaCO_3$-Träger geeignet.

Gewöhnlich enthält der Kalkstein für die notwendige chemische Zusammensetzung des Portlandzementrohmehls zu geringe Anteile an SiO_2 und Al_2O_3, die durch den Rohstoff Ton ein-

geführt werden können. Dafür sind auch Schlacken und Aschen geeignet.
Als dritte Rohstoffkomponente kann Sand oder Sandstein zur Erhöhung des SiO_2-Gehalts im Rohmehl dienen. Teilweise ist es erforderlich, den Fe_2O_3-Gehalt durch einen Zusatz von Eisenerz, Pyritabbrand o. a. eisenhaltigen Stoffen zu gewährleisten. Die Rohstoffe werden in Prall-, Kegel- oder Backenbrechern (vgl. 1.6.1.) getrennt vorzerkleinert. Entweder erfolgt die Grobzerkleinerung mit fahrbaren Brechern im Tagebau und der Transport zum Zementwerk mit Förderbändern, oder das gesprengte Material wird mit Schwerlastkraftwagen einer zentralen Brecherstation aufgegeben, von der es in das Werk gelangt. Bei der Grobzerkleinerung wird das Gut auf eine Korngröße < 1 dm zerkleinert.
Naßverfahren. Die Feinmahlung der Rohstoffe erfolgt in Mehrkammerrohrmühlen unter Zusatz von 30 bis 40 % Wasser, so daß nach der Mahlung ein pumpfähiger Schlamm vorliegt, der in Homogenisiersilos gelangt. Es ist möglich, die feinkörnigen Rohstoffe in den Silos zu mischen oder sie gemeinsam zu mahlen. Durch die heißen Abgase des Drehrohrofens wird durch Einrichtungen vor dem Ofen (Abb. 6.1.4-2, Tafel 16) oder im ersten Teil des Ofens durch Ketteneinbauten der Schlamm getrocknet. Vorteile des Naßverfahrens sind die geringe Staubentwicklung, die hohen Mühlendurchsätze bei der Rohschlammahlung und die gute Homogenität des Schlamms. Nachteilig ist der hohe Wärmeaufwand für die Verdunstung des Wassers, so daß zur Produktion von 1 kg Portlandzementklinker 5 bis 8 MJ an thermischer Energie erforderlich sind.
Beim *Halbtrockenverfahren* müssen die Rohstoffe wie beim Trockenverfahren bei der Mahlung einen Wassergehalt < 2 % besitzen, um Anbackungen zu vermeiden; deshalb muß zumindest der Ton getrocknet werden. Die Feinmahlung erfolgt in Mehrkammerrohr- oder Federrollenmühlen gewöhnlich als Umlaufmahlung. Dabei wird das gemahlene Gut einem Sichter aufgegeben, der nach der Korngröße in Fertiggut und Grieße trennt, die wieder der Mühle aufgegeben werden. Das Fertiggut hat eine Korngröße von < 0,1 mm. Ein Becherwerk oder ein Luftstrom transportieren das Mahlgut von der Mühle zum Sichter, so daß die Mühlen als Becherwerkumlauf- oder Luftstrommühlen bezeichnet werden. Es ist möglich, die Trocknung und Mahlung der Rohstoffe in der Mühle durch eine Mahltrocknung zu vereinigen. Als Trockenmedium dient das heiße Abgas des Ofens o. a. Verbrennungsgase. Die trockengemahlenen Rohmehle erfordern einen höheren technologischen und elektroenergetischen Aufwand für die Homogenisierung als naßgemahlener Rohschlamm. Das trockene Rohmehl wird auf einem Granulierteller durch Zugabe von 12 bis 15 % Wasser in nußgroße Granalien überführt, die

einem Wanderrost, dem *Lepolrost**, aufgegeben werden. Die heißen Abgase des Drehrohrofens strömen im Kreuzstrom durch die Granalienschüttung und heizen sie bis zu einer Temperatur von 800 °C auf. Die vorgewärmten Granalien gelangen anschließend in den Drehrohrofen. Der Wärmebedarf beträgt beim Halbtrockenverfahren 4 bis 5 MJ/kg Klinker.
Trockenverfahren. Hierbei wird das Rohmehl ebenfalls in einer separaten Anlage vorgewärmt und damit ein besserer Wärmeübergang von den heißen Abgasen des Drehrohrofens auf das Rohmehl erzielt. Als Vorwärmer werden Kombinationen von Zyklonen und Fallschächten verwendet (Abb. 6.1.4-3). Der konvektive Wärmeübergang erfolgt im Zyklon im Gleichstrom, in der Flugstaubwolke und im Fallschacht im Gegenstrom nach dem Prinzip der Rieselschicht. Im Vorwärmer wird das Rohmehl auf eine Temperatur von 800 °C aufgeheizt, was durch die heißen Abgase des Drehrohrofens oder durch eine Zusatzfeuerung im Vorwärmer erreicht wird. Das Trockenverfahren hat einen Wärmebedarf von 3 bis 4 MJ/kg Klinker. Mit einem höheren Energieaufwand werden lange Drehrohröfen nach dem Trockenverfahren ohne Vorwärmer betrieben, die technologisch leicht beherrschbar

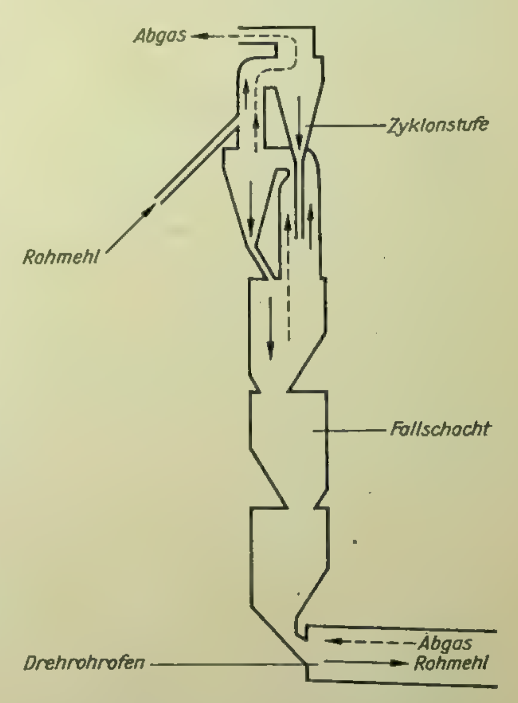


Abb. 6.1.4-3 Schachtvorwärmer für die Herstellung von Portlandzement nach dem Trockenverfahren

sind. Das Trockenverfahren erfordert große Aufwendungen für die Entstaubung.
Vom Vorwärmer gelangt das Rohmehl in den *Drehrohrofen*, einem bis zu 270 m, üblicherweise ≈ 100 m langen Hohlzylinder aus Stahlblech mit einem Durchmesser bis zu 8 m, der innen mit feuerfesten Materialien ausgekleidet ist (Tafel 20). Er ist auf Rollen gelagert und wird von einem Elektromotor mit 1 U/min angetrieben. Wegen der Drehung und einer Neigung von 4° wandert das Brenngut vom Ofeneinlauf zum Auslauf. Dabei wird es bis zu einer Temperatur von 1450 °C erhitzt. Die Temperatur wird durch die Verbrennung von Heizöl, Erdgas oder Kohlenstaub am Auslaufende im Brenner erzeugt, so daß ein wärmewirtschaftlich günstiger Gegenstrom von Heißgas und Brenngut zustande kommt. Man unterscheidet vom Brenner in Richtung des Ofeneinlaufs eine *Sinterzone* mit einer Temperatur von 1200 bis 1450 °C, die *Kalzinierzone* mit 800 bis 1200 °C, die *Vorwärmzone* bis 800 °C und bei Naßöfen die *Trockenzone* bis 200 °C. Der Wärmeübergang erfolgt in der Sinterzone durch Strahlung der Flamme auf das Gut, in den anderen Bereichen vorrangig durch Konvektion. Die Ofenatmosphäre ist oxydierend, um eine vollständige Verbrennung des Brennstoffs und das Vorhandensein der Verbindung Fe_2O_3 zu gewährleisten.
Im Vorwärmer und Drehrohrofen laufen die für das Portlandzementrohmehl typischen Reaktionen ab. Als Hauptreaktionen bezeichnet man folgende Vorgänge: Bei Materialtemperaturen bis zu 100 °C erfolgt die Trocknung des Brennguts. Im Temperaturbereich von 400 bis 600 °C wird das in den Tonen chemisch gebundene Wasser in einer endothermen Reaktion ausgetrieben. Zwischen 600 und 1200 °C entsäuert der Kalkstein. Im gleichen Temperaturbereich laufen exotherme chemische Reaktionen zwischen CaO und SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3 wie bei den hydraulischen Kalken im festen Zustand ab. Der wichtigste Teil der Klinkerbildung erfolgt zwischen 1200 und 1450 °C, wobei im Brenngut 30 % Schmelzphase vorhanden sind, so daß das Gut teigig und klebrig wird. Es bilden sich die *Klinkerminerale Alit* (vorwiegend $3CaO \cdot SiO_2$, 50 %), *Belit* ($2CaO \cdot SiO_2$, 25 %), *Celit* ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, 10 %) und das Klinkermineral $3CaO \cdot Al_2O_3$ (10 %), der Rest besteht aus CaO und MgO. Die Klinkerminerale sind keine reinen Verbindungen, sondern kompliziert aufgebaute Mischkristalle, die nur in der für Portlandzementklinker typischen Mineralgesellschaft ihre erforderlichen Eigenschaften bei der Erhärtung entfalten. Das Hochtemperaturgleichgewicht ist bei Raumtemperatur instabil, und der Klinker muß rasch abgeschreckt werden, damit die Klinkerminerale unterkühlt erhalten bleiben und sich nicht in die bei Raumtemperatur beständigen Phasen umwandeln. Als Nebenreaktionen bezeichnet man die Verdampfung der Alkalibestandteile beim Klinkerbrand und die Einwirkung der Brennstoffasche und Verbrennungsgase auf den Klinker. Technisch erhält man die Klinkerminerale, indem der heiße Klinker aus dem Drehrohrofen in einen Kühler fällt, der die Verbrennungsluft vorwärmt und den Klinker abschreckt. Übliche Kühlerkonstruktionen sind Kühlrohre nach dem Prinzip des Drehrohrofens oder Rostkühler.
Der kalte Klinker wird in einem Brecher vorzerkleinert und gemeinsam mit 2 bis 5 % Gips- oder Anhydritgestein und teilweise mit Zumahlstoffen feingemahlen. Als *Zumahlstoffe* werden für Portlandzement oft Gesteinsmehl aus Kalkstein, Granit, Porphyrit u. a. verwendet. Die *Zementmahlung* wird als Umlauf- oder Durchlaufmahlung in Mehrkammerrohrmühlen bzw. Federrollenmühlen durchgeführt.
Nach der Mahlung wird der Zement in Silos gelagert und lose oder abgesackt verschickt. Der Transport der feinkörnigen Pulver geschieht im Zementwerk mechanisch in gekapselten Förderbändern und -schnecken oder pneumatisch mit Druckluft in Rohren oder Rinnen.
Herstellung von Zement mit Zumahlstoffen. Als Zumahlstoffe werden Schlacken der Roheisen-, Nickel- und Kupferherstellung und Brennstoffaschen eingesetzt. Voraussetzung für ein latenthydraulisches Verhalten der Zumahlstoffe ist ein hoher Gehalt an CaO und eine glasige Struktur. Die Schlacke erstarrt glasig, wenn sie im

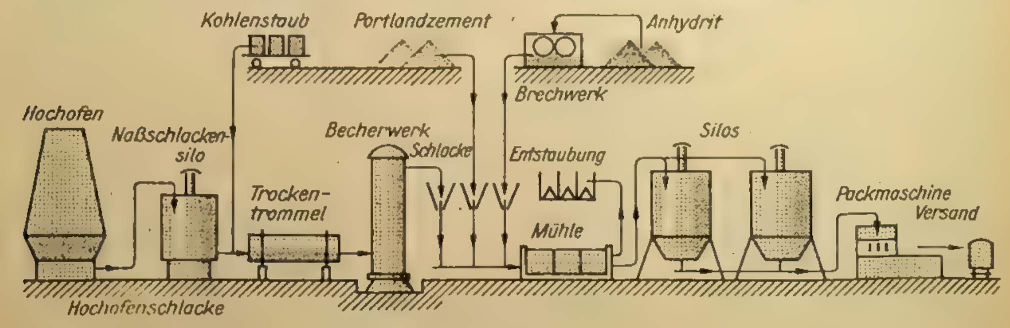


Abb. 6.1.4-4 Herstellung von Zement mit Zumahlstoffen ZZ 4

schmelzflüssigen Zustand direkt in ein Wasserbad oder durch einen Luftstrom läuft, abgeschreckt und dabei granuliert wird. Wegen der anhaftenden Feuchtigkeit muß die Schlacke vor der Mahlung getrocknet werden. Das Werk für die Produktion von Zement mit Zumahlstoffen ist ein Mahlbetrieb (Abb. 6.1.4-4), der keinen Ofen für hohe Temperaturen benötigt. Außerdem muß im Gegensatz zu einem Portlandzementwerk nur in einer technologischen Stufe feingemahlen werden. Der Zumahlstoff wird mit Portlandzementklinker oder Portlandzement und mit Gips- oder Anhydritgestein in einer Rohrmühle gemahlen oder gemischt. Die Produktion von Zementen mit Zumahlstoffen ist deshalb technologisch einfach, ökonomisch und energiewirtschaftlich vorteilhaft.

Koppelproduktionen. In der Hüttenindustrie, der chemischen Industrie, der Energiewirtschaft und beim Bergbau fallen Abprodukte an, die aus den chemischen Grundbestandteilen des Zements bestehen, so daß sie zu Zement verarbeitet werden können. Bei den Koppelproduktionen werden *alle* Bestandteile der Rohstoffe zu einem Produkt mit Gebrauchswert verarbeitet. Zum Beispiel werden beim *Gips-Schwefelsäure-Verfahren* aus Rohgips oder -anhydrit, Alumosilikaten und Koks die Produkte Schwefelsäure und Portlandzement erzeugt. Ton, Kaolin oder alumosilikatische Aschen ermöglichen die gleichzeitige Produktion von Aluminium und Zement. Technisch eingeführt ist auch die Erzeugung von Elektroenergie und Zement aus Ölschiefer.

Ein besonderes Problem der Zementindustrie ist die Beherrschung des *Zementstaubs*. Staub entsteht bei der Mahlung des Rohmehls, im Ofen durch die mit einer hohen Geschwindigkeit strömenden Gase und durch Verdampfung einzelner Verbindungen, die in kälteren Teilen der Anlage sublimieren und bei Raumtemperatur fest vorliegen, bei der Mahlung des Zements, bei der Verladung und bei allen Fördereinrichtungen. Zementstaub ist nicht toxisch und stellt deshalb keine direkte Gefahr für den menschlichen und tierischen Organismus dar. Unangenehm und gefährlich ist die Verschmutzung der Landschaft, Pflanzen und Straßen. Neben der Umweltverschmutzung verursacht der Staub ökonomische Verluste, da er aus Material besteht, das bergmännisch gewonnen, aufbereitet und teilweise gebrannt wurde. Eine Staubabscheidung ist deshalb erforderlich. Der Staubauswurf wird im Zementwerk durch eine Vielzahl von Staubabscheidern in Zyklonen, Elektro- und Gewebefiltern begrenzt, so daß die gesetzlich vorgeschriebenen Staubemissionswerte eingehalten werden können. Der abgeschiedene Staub wird in den Produktionsprozeß zurückgeführt oder zu einem Bindemittel mit geringer Festigkeit verarbeitet.

Eigenschaften der Zemente. Nach dem Anmachen mit Wasser durchläuft der Zementmörtel 2 zeitliche Phasen, die mit Erstarrung und Erhärtung bezeichnet werden. Die *Erstarrung des Zements* kennzeichnet die Abnahme der Verformbarkeit des Zementmörtels am Beginn der Verfestigung. Sie beginnt nach mehreren Stunden und endet spätestens nach 12 h. Die *Erhärtung des Zements* wird mit der Festigkeit charakterisiert. Sie beginnt mit der Erstarrung und dauert mehrere Jahre. Nach einer Erhärtungszeit von 28 Tagen nimmt die Erhärtung nur noch wenig zu (vgl. Abb. 6.1.0-1). Die Zemente müssen raumbeständig sein; sie dürfen das bei der Verfestigung eingenommene Volumen nicht nennenswert ändern und weder merklich schwinden noch sich ausdehnen. Erstarrung und Erhärtung des Zements beruhen auf chemischen Reaktionen der Klinkerminerale mit Wasser und Zumahlstoffen. Wenn kein $CaSO_4$ anwesend ist, reagiert direkt nach dem Anmachen das Klinkermineral $3CaO \cdot Al_2O_3$ mit Wasser zu der Verbindung der allgemeinen Formel $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$. Die Neubildung schafft Brücken zwischen den Zementteilchen und läßt den Zement unkontrolliert in wenigen Minuten erstarren. Damit diese Reaktion verhindert wird, enthält der Zement Rohgips oder -anhydrit. In Gegenwart dieses Zusatzes bildet sich sofort nach dem Anmachen des Zements mit Wasser in wenigen Minuten ein Kalziumaluminiumsulfathydrat, der *Ettringit*, der unmittelbar an der Oberfläche der Zementteilchen entsteht, einen weiteren Angriff des Wassers auf den Zement verzögert und so das Erstarren erst nach mehreren Stunden gestattet. Die Erhärtung ist hauptsächlich mit der Bildung von Kalziumsilikathydraten der ungefähren chemischen Zusammensetzung $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ verbunden. Die Neubildungen wachsen als Folien oder Fasern in die Poren des Zementmörtels, verkitten die Zuschlagstoffkörner, verdichten den Baustoff und erzeugen so eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Feststoffteilchen. Die Neubildungen haben eine Größe von 10^{-6} bis 10^{-8} m und erhalten so Eigenschaften von Gelen. In der gleichen Größenordnung liegen die Poren im erhärteten Zement. Die chemische Zusammensetzung zeigt, daß die bei der Erhärtung entstehenden Neubildungen weniger CaO als die Klinkerminerale enthalten. Deshalb entsteht bei der Verfestigung der Zemente stets die Verbindung $Ca(OH)_2$, die das Milieu in den Zementmörteln selbst nach Jahren noch basisch erhält und Stahl vor Korrosion schützt. Im Laufe der Zeit entsteht wie bei den Luftkalken mit dem CO_2 der Luft $CaCO_3$.

6.2. Keramik

Keramik ist eine Sammelbezeichnung für nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe, die nach einer speziellen Technologie hergestellt werden.

Typisch für die keramische Technologie ist, daß ein Pulver bei Raumtemperatur geformt wird und daß der Formling bei hohen Temperaturen gesintert und dabei verfestigt wird. Der Begriff Keramik bezeichnet üblicherweise eine bestimmte Werkstoffgruppe; manchmal versteht man unter Keramik die keramische Technologie oder die keramische Industrie. In diesem Sinne bezeichnet man mit Keramik den Teil der silikattechnischen Industrie oder die spezielle Technologie, die keramische Werkstoffe oder Erzeugnisse herstellt.
Ausgehend von der griechischen Bezeichnung „keramos" verstand man unter Keramik bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts Erzeugnisse aus gebranntem Ton, die nach einer in ihren Grundzügen konstanten Technologie hergestellt wurden. Sowohl die Rohstoffe als auch die keramischen Fertigprodukte waren Silikate. In neuerer Zeit wird die keramische Technologie und der Begriff Keramik auch für nichtsilikatische und sogar nichtoxidische Werkstoffe angewendet. Bei einigen speziellen Keramiken sind Silikate störende Verunreinigungen. Stofflich gesehen bilden jedoch auch heute die Silikate die größte Gruppe der keramischen Erzeugnisse. Darüber hinaus besteht die Keramik meistens aus Oxiden. Technische Bedeutung besitzen als Keramik aber auch Kohlenstoff, Karbide, Nitride, Silizide, Sulfide, Boride und Halogenide. Im amerikanischen Sprachraum versteht man deshalb unter „ceramics" laut Festlegung einer Normungskommission die Wissenschaft und Technik aller nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffe. Bindemittel, Glas, herkömmliche Keramik, Email und anorganisch-nichtmetallische Einkristalle sind Unterabteilungen des Begriffs „ceramics".
Die keramischen Werkstoffe bestehen aus Kristallen, die oft durch eine glasige oder feinkristalline Bindematrix verkittet werden. Typisch für die Keramik ist, daß im keramischen Erzeugnis Poren enthalten sind. Die Poren sind mit Gasen gefüllt und beeinflussen in vielfältiger Weise die Eigenschaften der Keramik. Man unterscheidet eine offene und eine geschlossene Porosität. Die *offenen Poren* sind zur Oberfläche des Erzeugnisses offen und können deshalb mit Wasser gefüllt werden. Die *geschlossenen Poren* sind vollständig vom festen Material der Keramik eingeschlossen und nicht von außen ohne Zerstörung des Werkstoffs zugänglich. Unter *Porosität* versteht man den prozentualen Volumenanteil des Werkstoffs, der nicht von festem Material ausgefüllt ist, sondern durch Hohlräume gebildet wird.
Wesentliche Merkmale keramischer Erzeugnisse sind ihr ausgesprochen sprödes Verhalten bei mechanischer Belastung, ihre Unlöslichkeit in Wasser und in den meisten Säuren und Laugen,

Tab. 6.2.0-1 *Übersicht über die keramischen Erzeugnisse*

Klassifizierung	Erzeugnisse
Grobkeramik	
poröse Grobkeramik	Ziegel, Dachziegel, Tonrohre, Blumentöpfe, Ofenkacheln, Töpferschamotte, feuerfeste Baustoffe, Schleifscheiben, Kunstkeramik
dichte Grobkeramik	Klinker, Spalt- und Fußbodenplatten, Grobsteinzeug, säurefeste Steine, schmelzflüssig gegossene feuerfeste Steine, Schlackensteine, Schmelzbasalt
Feinkeramik	
poröse Feinkeramik	Steingut, Sanitärporzellan, Vitreous China, Filterkeramik, poröse Oxidkeramik
dichte Feinkeramik	Porzellan, Feinsteinzeug, Steatit, dichte Oxidkeramik, Elektrokeramik, Magnetkeramik, Piezokeramik, Kondensatorkeramik, Kunstkohle, Cermets, Glaskeramik

die geringe Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität, die Beständigkeit bei höheren Temperaturen und die Empfindlichkeit gegen plötzlichen Temperaturwechsel. Für das spezielle Einsatzgebiet sind einzelne Eigenschaften bei jedem keramischen Erzeugnis besonders entwickelt oder zurückgedrängt.
Die Anwendung der Keramik umfaßt ein weites Gebiet, und man unterscheidet nach dem Verwendungszweck Kunst-, Bau-, Haushalt-, Hochtemperatur-, verschleißfeste, korrosionsbeständige, Elektro- und Magneto-, Nuklear- und Raumfahrtkeramik.
Teilweise zählt man die Pulvermetallurgie wegen ihrer der Keramik sehr ähnlichen Technologie zur Keramik und bezeichnet sie als *Metallkeramik*. Eine übliche Einteilung der Keramik erfolgt nach der Makrostruktur und nach der Scherbendichte der Erzeugnisse. Bei der *Grobkeramik* erkennt man an einer Bruchfläche mit dem bloßen Auge im Scherben Inhomogenitäten mit einer Größe >0,1 mm. *Feinkeramik* besitzt keine mit dem Auge erkennbaren Inhomogenitäten. *Poröse Keramik* hat eine hohe Porosität und meist durchgehende oder offene Poren. *Dichte Keramik* besitzt eine geringe Porosität und überwiegend geschlossene Poren. Teilweise wird nach *Tonkeramik* und *Sonderkeramik* unterschieden, wobei letztere nicht aus den gewöhnlichen Rohstoffen Ton und Sand hergestellt wird. Tab. 6.2.0-1 gibt einen Überblick über die keramischen Erzeugnisse.

6.2.1. Rohstoffe der Keramik

Plastische Rohstoffe sind im trockenen Zustand fest und hart, werden jedoch nach Vermischen mit dem Anmachwasser teigig oder plastisch.

Sie lassen sich im plastischen Zustand in einem gewissen Maße bleibend verformen, ohne daß der innere Zusammenhalt der festen Teilchen verloren geht. Beim Austrocknen verringert das geformte Stück sein Volumen; es unterliegt der *Trockenschwindung*, wobei sich die Festigkeit erhöht. Der ausgetrocknete spröde Körper wird durch Wasserzugabe wieder plastisch. Erst durch das *Brennen* bei hohen Temperaturen geht die Plastizität oder Bildsamkeit verloren. Zu den plastischen Rohstoffen gehören Kaolin und Ton, in Sonderfällen auch gelöschter Kalk, Bauxit u. a. Materialien.

Ton und *Kaolin* sind Verwitterungsprodukte der Feldspäte oder feldspathaltigen Gesteine. Durch den Angriff des Wassers und unter spezifischen klimatischen Verhältnissen entstanden aus den Feldspäten Aluminiumhydrosilikate, die als Minerale *Kaolinit* oder *Montmorillonit* heißen. *Illit* ist ein hydrolytisches Verwitterungsprodukt von Kaliglimmer. Kaolinit, Montmorillonit und Illit sind als *Tonminerale* die Ursache der Plastizität der plastischen Rohstoffe, weil sie sehr feinkörnig und oft plättchenförmig ausgebildet sind und an der Oberfläche Wasser anlagern können, so daß eine gewisse Verschiebung der Tonmineralteilchen und eine Bildsamkeit möglich ist. Kaolinit $Al_2O_3 \cdot 2\,SiO_2 \cdot 2\,H_2O$ besteht aus hexagonalen Plättchen mit einer Größe $< 10\,\mu m$. Montmorillonit kann in sein Kristallgitter Wasser einlagern, so daß er aufquillt und außerordentlich plastisch wird. Tone aus Montmorillonit heißen *Bentonite*. Illit ist sehr feinkörnig und besitzt keine definierte Gestalt. Bleiben die Verwitterungsprodukte der Feldspäte am Ort der Entstehung liegen, so bezeichnet man sie als *Rohkaolin*. Durch einen technischen Trennprozeß wird das Grobe des Rohkaolins, das hauptsächlich aus Quarzsand besteht, vom Feinen, dem Kaolin, abgetrennt. Tone sind sedimentäre Bildungen. Sie wurden in geologischen Zeiträumen durch Wasser vom Entstehungsort weggespült, dabei klassiert, und sie sedimentierten in Seen oder Flußmündungen; deshalb sind sie stärker als der geschlämmte Kaolin durch Quarz, Eisenverbindungen, Kalkstein oder Gips verunreinigt. Außerdem sind sie gewöhnlich feinkörniger und plastischer als die Kaoline. Aus diesem Grunde sintert Ton bei einer geringeren Temperatur, schwindet stärker und besitzt eine höhere Trokkenfestigkeit als Kaolin. Vor und nach dem Brand ist Kaolin meist weiß, während Ton gelb, rot oder grau gefärbt ist. Die Tone und Kaoline aus einem Vorkommen besitzen gegenüber Tonen und Kaolinen anderer Vorkommen ein sehr spezifisches Verhalten bei der technischen Verarbeitung. Es ist deshalb nicht ohne weitere Veränderungen möglich, einen Wechsel der Sorten vorzunehmen. Meist werden mehrere Sorten an plastischen Rohstoffen gleichzeitig verwendet, um Eigenschaftsänderungen eines natürlichen Rohstoffs auszugleichen.

Tone und Kaoline stellen für eine Reihe von keramischen Werkstoffen den Hauptrohstoff dar. Sie werden auch in kleinen Mengen zur Plastifizierung unplastischer Rohstoffe verwendet. Oft unterscheidet man die Tone nach ihrer Verwendung und bezeichnet sie als Ziegelton, Steinzeugton, feuerfester Ton. *Lehm* oder *Ziegelton* enthält einen relativ kleinen Anteil an Tonmineralen und eine bedeutende Menge an Verunreinigungen, wie Quarz, Kalkstein, Dolomit, Gips und Eisenverbindungen. Die Rohstoffe *Pyrophyllit* $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ und *Talk* $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ haben eine geringere Plastizität als die Tonminerale. Sie werden als Rohstoffe für spezielle keramische Werkstoffe verwendet. Talk bildet als *Speckstein* die Rohstoffbasis für den elektrokeramischen Isolierwerkstoff *Steatit*.

Unplastische Rohstoffe haben wie die meisten festen Materialien keine plastischen Eigenschaften. Sie erfüllen in den keramischen Werkstoffen ihren Zweck als Magerungsmittel, Füll-, Ausbrennstoff oder Flußmittel. Sie geben den ton- und kaolinhaltigen Massen für die Formgebung, das Trocknen und Brennen oder dem gebrannten Scherben die gewünschten Eigenschaften. *Magerungsmittel* werden den plastischen Rohstoffen zugegeben, um deren Schwindung beim Trocknen und Brennen zu verringern und so Verformungen oder Risse zu verhindern. *Ausbrennstoffe* verbrennen während der Sinterung und hinterlassen Poren im Werkstoff. *Flußmittel* sind Stoffe, die bei den hohen Temperaturen des keramischen Brandes eine Schmelze im Werkstoff erzeugen.

Quarz und *Quarzsand* sind die am häufigsten verwendeten unplastischen Rohstoffe. Die Zumischung von feinkörnigem Quarz zur keramischen Masse vermindert die Plastizität, die Schwindung und die Festigkeit und beschleunigt die Trocknung, vermindert die Rißgefahr beim Trocknen, verzögert die Sinterung und erhöht die Standfestigkeit des Scherbens im Feuer. Quarz ist oft in den plastischen Rohstoffen enthalten und muß dann nicht zusätzlich in die Masse eingeführt werden; er wird für die Entstehung der keramischen *Glasuren* benötigt. Die Gesteine Quarzit und Flintstein sind die Rohstoffe zur Herstellung der feuerfesten Silikasteine.

Kalifeldspat $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ wird in keramischen Massen für Porzellan, Steingut und -zeug als Flußmittel verwendet, das in einem breiten Temperaturintervall eine zähe silikatische Schmelze bildet, so daß die Keramik im Feuer eine hohe Standfestigkeit besitzt. Auf diese Weise behalten Gegenstände mit freitragenden Teilen, wie Keramikfiguren oder Porzellantellerränder, ihre Gestalt. Kalifeldspat wird aus Skandinavien eingeführt oder stammt aus den Feldspatsanden Thüringens. Für farbige und dunkle Massen werden auch feldspathaltige

Gesteine und für Glasuren Natronfeldspat verwendet. Mit Hilfe der Feldspäte gelingt es, wasserunlösliche Alkalioxidbestandteile der keramischen Masse zuzugeben.

Kalkstein $CaCO_3$ dient im Steingut als Flußmittel. Ziegelton enthält Kalkstein, der mit dem Eisenoxid gleichfalls das Flußmittel beim Brennen der Ziegelerzeugnisse bildet.

Der *Magnesit* $MgCO_3$ ist der Rohstoff für die feuerfesten Magnesiasteine. *Dolomit* $CaMg(CO_3)_2$ ist ein wesentlicher Bestandteil der Porzellanglasuren und der Rohstoff für den feuerfesten Baustoff Sinterdolomit. Barium- und Strontiumkarbonat werden als chemisch hergestellte Produkte in der Elektrokeramik eingesetzt. Ähnliches gilt für Zirkon-, Titan-, Beryllium- und Thoriumoxid und für die Oxide der seltenen Erden.

Tonerdehydrat, Tonerde und *Korund* sind die Rohstoffe für die Oxidkeramik auf der Basis von Al_2O_3. Auch Porzellan, feuerfeste Steine und Schleifscheiben werden unter Zugabe von Al_2O_3 hergestellt.

Siliziumkarbid SiC wird für Schleifscheiben, hochfeuerfeste Erzeugnisse, Brennhilfsmittel und als Heizleiter verwendet.

Für Spezialkeramik, als Glasurrohstoffe und als keramische Farbkörper wird eine Vielzahl weiterer natürlicher Rohstoffe, technischer Produkte oder Chemikalien verwendet. Zur Erzeugung der weißen Farbe des Scherbens, wie er z. B. für Porzellan erforderlich ist, darf der Anteil an färbenden Bestandteilen, insbesondere an Eisenverbindungen, einen geringen Grenzwert nicht übersteigen.

6.2.2. Technologie der Keramik

Die natürlichen Rohstoffe, wie Ton und Sand, werden bergmännisch meist im Tagebau gewonnen (Abb. 6.2.2-1; vgl. 1.2.4.).

Aufbereitung. Dazu werden Wasser und gelegentlich weitere feste Stoffe den Grundrohstoffen zugegeben. Die Aufbereitung hat das Ziel, eine homogene *keramische Masse* herzustellen, deren Zusammensetzung, der Versatz, durch Zerkleinern und Mischen von Rohstoffen, Wasser und Zusätzen hergestellt wird. Die keramische Masse muß hinsichtlich der Verteilung der Versatzkomponenten, der Korngrößen und des Wassers sowie hinsichtlich der Ausrichtung von plättchen- oder nadelförmigen Teilchen homogen sein. Diese Homogenität ist nur schwer zu erreichen. Inhomogenitäten in keramischen Massen führen zu Schwierigkeiten in den nachfolgenden technologischen Stufen und oft zur Qualitätsminderung.

Aufbereitungsarten. Bei der *Trockenaufbereitung* werden die getrockneten plastischen und die spröden Rohstoffe trocken zerkleinert und gemischt. Die *Halbnaßaufbereitung* schließt eine Mischung des feuchten Tones mit den getrennt trocken zerkleinerten unplastischen Rohstoffen ein und ergibt eine schlechte Homogenität der Masse. Dagegen erreicht man mit der *Naßaufbereitung* die beste Homogenität der Mischung. Dabei werden die unplastischen Rohstoffe naß gemahlen, die plastischen Rohstoffe aufgeschlämmt und beide naß gemischt. Das Wasser wird teilweise oder ganz in Filterpressen oder Sprühtrocknern entfernt.

Formgebung. Der sich an die Aufbereitung anschließende Formgebungsprozeß geschieht je nach dem Feuchtigkeitsgehalt mit folgenden Massen:

- Trockenpreßmasse mit 3 bis 8 % Wasser,
- Feuchtpreßmasse mit 8 bis 15 % Wasser,
- plastische Masse mit 15 bis 25 % Wasser,
- Gießmasse mit 25 bis 40 % Wasser.

Beim *Gießen* wird eine wäßrige Suspension, der *keramische Schlicker*, in Gipsformen gegossen (Abb. 6.2.2-2). Die poröse Gipsform entzieht dem Schlicker Wasser, so daß sich an dem Gips eine Schicht aus keramischer Masse ansetzt. Die Masse löst sich durch das Trocknen von der Gipsform ab, und das geformte Erzeugnis wird als Rohling entnommen. Um die Suspension zu stabilisieren und einen möglichst geringen Wassergehalt des Schlickers zu erhalten, werden Verflüssigungsmittel, wie Wasserglas, Soda u. a. Stoffe, zugesetzt. Durch Gießen können beliebig gestaltete Formen erzeugt werden.

Plastische Formgebung. Dabei wird die Bildsamkeit der plastischen Masse ausgenutzt, die durch die Tonminerale hervorgerufen wird. Die plastische Formgebung erfolgt mit Strangpressen, in denen die Form des Mundstücks auf die keramische Masse übertragen wird, oder durch Ein- oder Überdrehen auf Drehscheiben, so daß rotationssymmetrische Formen, wie Teller oder

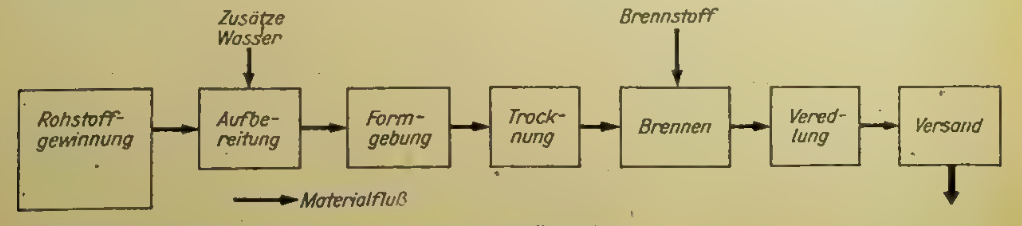


Abb. 6.2.2-1 Technologisches Schema eines Keramikbetriebs

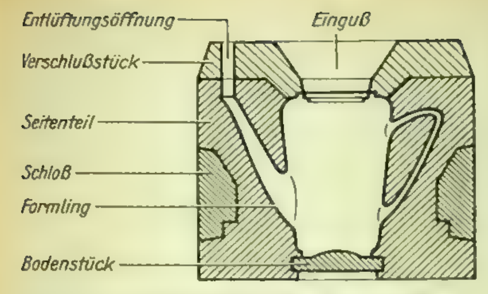


Abb. 6.2.2-2 Schnitt durch eine Hohlgießform, deren Teile durch sog. Schlösser zusammengehalten werden; das Bodenstück formt den gewölbten Boden

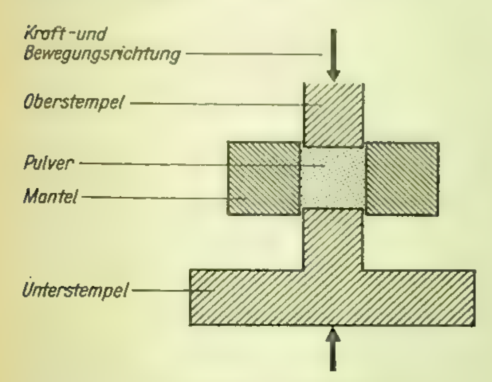


Abb. 6.2.2-3 Schema des Trockenpressens in einer Stahlform

Tassen, entstehen. Auch das Freidrehen auf der Töpferscheibe nutzt die Bildsamkeit zur künstlerischen Gestaltung der keramischen Masse aus. Plastische Massen können ohne Wasser mit Wachs oder Paraffin erzeugt werden und als Spritzmassen geformt werden. Wichtig ist bei allen Methoden, daß eine rissefreie Verformung erreicht wird.

Trockenpressen. Als Material dient wenig feuchtes Pulver aus plastischen Rohstoffen oder mit einem Plastifizierungsmittel gemischtes Pulver (Trockenpreßmasse). Da der Preßdruck höher als bei den Feuchtpreßmassen liegt, werden Stahlformen verwendet (Abb. 6.2.2-3). Die Pressen werden hydraulisch oder mechanisch angetrieben. Trockengepreßte Erzeugnisse zeichnen sich durch hohe Maßhaltigkeit und Kantenfestigkeit aus. Es lassen sich besonders gut flache Formen ohne Unterschneidungen pressen.

Isostatisches Pressen. Hierbei wird das Pulver allseitig in einer Flüssigkeit unter Druck gesetzt und gleichmäßig in einer elastischen Form verdichtet. Deshalb eignet sich das isostatische Pressen besonders für die Formgebung von Kugeln, Zylindern und Rohren.

Heißpressen vereinigt die Formgebung und Sinterung. Stoffe, die sich bei Raumtemperatur nicht verdichten lassen oder die ohne Druck bei hohen Temperaturen nicht sintern, werden durch Heißpressen hergestellt. Es können nahezu porenfreie Werkstoffe erzeugt werden. Wegen des hohen technischen und personellen Aufwands werden das isostatische Pressen und das Heißpressen nur in Einzelfällen angewendet.

Durch die Formgebung entsteht die Gestalt des fertigen Erzeugnisses, das sich jedoch beim Trocknen und Brennen verkleinert.

Trocknung. Damit bei der raschen Temperatursteigerung beim Brennen durch den entweichenden Wasserdampf keine Risse oder Abplatzungen entstehen können, muß der Wassergehalt der geformten Masse verringert werden. Der feuchte keramische Rohling enthält Hüllenwasser, das die Feststoffteilchen umgibt, Porenwasser, das in den Räumen zwischen den festen Teilchen und in den Poren der festen Teilchen sitzt, und Adsorptionswasser, das an der Oberfläche der Feststoffteilchen adsorbiert ist. Bei der Temperaturerhöhung entweicht zunächst das Hüllen- und das Porenwasser, während die Entfernung des Adsorptionswassers Temperaturen > 100°C erfordert. Der Formling trocknet von außen nach innen aus. Dabei werden die Feststoffteilchen durch Kapillarkräfte zusammengepreßt, so daß eine Volumenverkleinerung, die *Trockenschwindung*, und eine Erhöhung der Festigkeit erfolgt. Der plastische Formling wird durch die Trocknung spröde. Eine ungleichmäßige Schwindung führt zu Spannungen und zu Rissen. Der gasdichte plastische Zustand wird durch die Trocknung in den gasdurchlässigen spröden Zustand überführt. Der Trocknungsvorgang ist ein wärmeenergetisch aufwendiger Prozeß. In den technischen Trocknungsanlagen kann die Ware bewegt werden oder in Ruhe sein und die Trocknungsluft natürlich oder künstlich bewegt werden. Die Trocknung erfolgt als Freilufttrocknung, über Öfen, durch Rauchgase o. a. Wärmeerzeuger in Trocknungsanlagen. Die Ware wird durch heiße Gase, durch Infrarotstrahlen oder Hochfrequenzwellen erwärmt.

Brennen. Hierbei erfolgt die Verfestigung des Formlings durch die einwirkende Temperatur. Der für den keramischen Brand typische Vorgang ist die Sinterung. Unter *Sinterung* versteht man einen physikalischen Prozeß, der sich in einer Verdichtung und Verfestigung des sinternden Materials unterhalb der Schmelztemperatur ohne Einwirkung äußerer mechanischer Kräfte äußert (vgl. 3.4.4.). Beim Sintern verringern sich die Oberfläche und der Porenraum, so daß der keramische Formling sein Volumen verkleinert und eine *Brennschwindung* erleidet. Trocken- und Brennschwindung sind die Ursache für die geringe Maßgenauigkeit der keramischen Erzeugnisse. Die Gestalt des Formlings bleibt beim Brand erhalten. Neben der Sinterung laufen in keramischen Massen bei hohen Tempe-

raturen weitere Vorgänge ab. In kristallinen Stoffen wachsen die Kristalle. Die Rohstoffkomponenten oder ihre Zersetzungsprodukte reagieren chemisch miteinander. Sie bilden feste oder flüssige Verbindungen. Die gasförmigen Produkte entweichen aus dem Scherben. Die Schmelze löst weitere feste Bestandteile des Scherbens auf. Die Sinterung wird durch die Gegenwart der Schmelze erleichtert und erfolgt als *nasse Sinterung*. Bei der Abkühlung erstarrt die Schmelze und verfestigt so die körnigen Stoffe. Die *trockene Sinterung* läuft zwischen den Pulverteilchen ohne Anwesenheit von Schmelze ab. Der Sinterprozeß wird beeinflußt durch die chemische Zusammensetzung der Masse, die Packungsdichte des Formlings, die Korngröße der Rohstoffteilchen, die Brenntemperatur, -zeit und -atmosphäre. Technisch erfolgt das Brennen der Keramik in periodisch oder kontinuierlich arbeitenden Öfen. Während die periodischen Öfen mit Ware beschickt, aufgeheizt, gebrannt, abgekühlt und entleert werden, wandert die Ware oder das Feuer durch die kontinuierlichen Öfen (vgl. Abb. 6.2.4-1). Die Kontrolle der Brenntemperatur erfolgt mit Thermoelementen, Pyrometern und Pyrometerkegeln. *Pyrometer-* oder *Segerkegel* sind kleine, dreiseitige, leicht geneigte Pyramiden, die aus unterschiedlichen Anteilen der üblichen keramischen Rohstoffe bestehen und die bei einer bestimmten Temperatur erweichen und ihre Spitze gegen die Unterlage neigen (Abb. 6.2.2-4). Sie sind chemisch so zusammengesetzt, daß sie je nach Pyrometerkegelklasse im Temperaturbereich von 600 bis 2000 °C fallen und so den Brennzustand der Keramik zuverlässig anzeigen. Nach dem Brand kann eine Nachbehandlung der Keramik durch Schleifen, Polieren, Bohren, Glasieren und Dekorieren oder Kitten und Verschmelzen erfolgen. Das Dekorieren betrifft vor

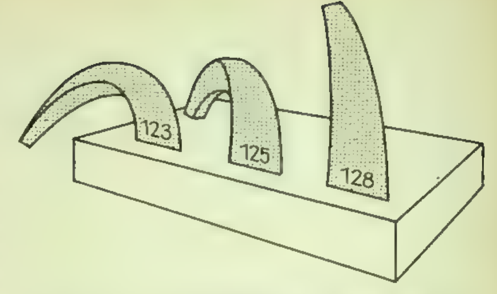


Abb. 6.2.2-4 Pyrometerkegel; 1250 °C sind erreicht, wenn die Spitze des Kegels 125 die Unterlage berührt

allem die Haushaltkeramik, die bemalt und verziert wird.

6.2.3. Grobkeramik

Baukeramik. *Mauerziegel* werden aus Ziegelton gefertigt, der einen gewissen Anteil an Magerungs- und Flußmittel enthält, so daß er zwischen Temperaturen von 1000 bis 1200 °C erweicht. Oft wird der Abbau von Ton und Sand in der Grube so gesteuert, daß die gesamte Ziegelmasse gleichzeitig gewonnen wird. Bei Anwesenheit größerer Kalksteinknollen muß das Material zerkleinert werden, damit der $CaCO_3$-Anteil mit dem Ton beim Brand reagiert. Liegt im gebrannten Ziegel ungebundenes CaO vor, so kann der Stein durch die Hydratation des CaO und die dabei auftretende Volumenvergrößerung gesprengt werden. Der Ziegelton wird naß aufbereitet und im plastischen oder halbtrockenen Zustand geformt. Die üblicherweise auf der Strangpresse hergestellten Formlinge werden in Trockenschuppen, -kammern oder -tunneln bis zu einem Wassergehalt von 5 % getrocknet. Dabei schwinden sie bis zu 10 %. Anschließend werden

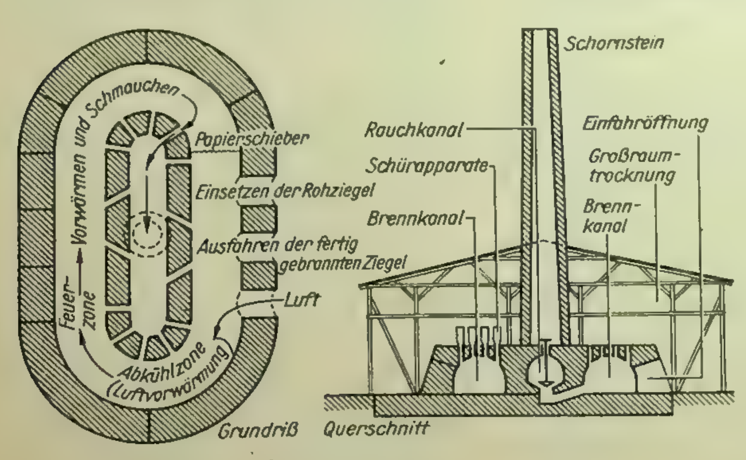


Abb. 6.2.3-1 Ziegelringofen

sie im Ring- oder Tunnelofen (Tafel 21) gebrannt. Im *Ringofen* (Abb. 6.2.3-1) wandert das Feuer durch den Brennkanal. Dabei wird die Verbrennungsluft durch die gebrannten Ziegel hindurchgesaugt und dabei aufgeheizt. Die heißen Abgase erwärmen auf ähnliche Weise das ungebrannte Einsatzgut. Beim Einsetzen der Rohziegel werden die einzelnen Kammern des Ofens durch Papierschieber abgetrennt, die bei hohen Temperaturen verbrennen und so den Weg der Luft und der Abgase bestimmen. Der Brennstoff wird von oben in den Ofen geschüttet.

Dachziegel und *Lochziegel* stellen höhere Ansprüche an die Rohstoffe und die Technologie als die Mauerziegel. Dachziegel werden auf Strangpressen gezogen oder in Revolverpressen gepreßt. Um die gewünschte Farbe zu erhalten, werden sie teilweise engobiert, d. h. mit einem keramischen Schlicker übergossen. Ähnlich wie die Zemente werden auch die Ziegel in standardisierte Festigkeitsklassen eingeteilt.

Klinker sind bei Temperaturen von 1200 bis 1300°C dicht gesinterte Ziegel. Durch Zusatz von Ausbrennstoffen, wie Kohle, Sägemehl oder Kunststoffe, und durch Schaummittel werden Ziegelerzeugnisse mit erhöhter Porosität hergestellt. Besonderen Anforderungen unterliegen die Ziegel hinsichtlich der Wärmedämmung und der Frostbeständigkeit.

Die Technologie zur Herstellung von *Töpferwaren* ist oft noch einfacher als die der Ziegel. Als Töpferwaren bezeichnet man Blumentöpfe, Töpferschamotte für Öfen, Ofenkacheln und kochfestes Geschirr. Teilweise muß die Töpferware zur Feinkeramik gerechnet werden. Die Erzeugnisse werden oft engobiert, um eine glatte und gefärbte Oberfläche zu erzeugen und ein feinkeramisches Aussehen zu schaffen.

Grobsteinzeug hat einen dichten und farbigen Scherben und wird für Kanalisationsrohre, Baukeramik, Säurebehälter und Haushaltgegenstände verwendet. Die Technologie ähnelt der der Ziegelherstellung. Die Erzeugnisse werden aus dichtsinternden Steinzeugtonen hergestellt, bei Temperaturen von 1200 bis 1300°C gebrannt und im Feuer durch Zusatz von Kochsalz glasiert. Bei Sauerstoffüberschuß im Ofen wird das Steinzeug braun, bei Sauerstoffmangel grau.

Feuerfeste Baustoffe. Als feuerfest wird ein Material bezeichnet, wenn ein aus ihm geformter Pyrometerkegel erst bei einer Temperatur >1500°C fällt. Hochfeuerfeste Werkstoffe haben einen Kegelfallpunkt >1800°C. Die Feuerfestigkeit eines Werkstoffs wird hauptsächlich von seiner chemischen Zusammensetzung bestimmt. Zur praktischen Beurteilung werden feuerfeste Baustoffe auf Druckfeuerbeständigkeit und Dauerfestigkeit im heißen Zustand geprüft. Die Druckfeuerbeständigkeit wird an zylindrischen und 50 mm hohen Proben ermittelt, die mit einer Spannung von 0,2 MPa belastet werden. Bei der Prüfung wird die Temperatur zu Beginn der Stauchung ermittelt. Weitere wichtige Eigenschaften feuerfester Materialien sind ihre Beständigkeit gegen Temperaturwechsel, gegen den Angriff von Schlakken und Aschen, ihre Volumenbeständigkeit und ihre Wärmeleitfähigkeit. Feuerfeste Baustoffe werden als Auskleidung zur Beherrschung hoher Temperaturen in Öfen der Metallurgie, Energiewirtschaft, Chemie, Glas-, Keramik- und Zementindustrie verwendet.

Schamottesteine. Als Rohstoffe dienen feuerfeste Tone. Aus einer plastischen Masse werden die Steine durch Strangziehen, Pressen oder Stampfen und aus einer unplastischen Masse durch Trockenpressen erzeugt. Die aus feuerfesten Tonen gebrannte Schamottekörnung wird dem rohen feuerfesten Ton als Magerungsmittel in Anteilen von 50 bis 90% zugesetzt. Der Brand erfolgt ähnlich den Ziegeln in Tunnelöfen bei einer Temperatur von 1400°C. Schamottesteine werden nach der Feuerfestigkeit und dem Gehalt an Al_2O_3 eingeteilt, wobei zwischen beiden eine proportionale Beziehung besteht. Zur Herstellung der tonerdereichen Steine wird Korund zugesetzt, so daß die Anwendungstemperaturen bis zu 1800°C steigen. Ebenso wie bei den Ziegeln können durch Ausbrenn- und Schaumstoffe wärmeisolierende und temperaturwechselbeständige Schamottesteine erzeugt werden.

Silikasteine werden aus Quarzit oder Flintstein hergestellt. Die Rohstoffe werden gewaschen, zerkleinert, mit Kalkmilch gemischt, von Hand gestampft oder trockengepreßt und bei Temperaturen von 1400 bis 1500°C gebrannt. Sie bestehen zu über 90% aus SiO_2 und sind bis 1650°C einsetzbar.

Magnesiasteine gehören zu den nichtsilikatischen feuerfesten Materialien. Sie werden aus einer Körnung von gesintertem MgO, das aus dem natürlichen Rohstoff Magnesit $MgCO_3$ oder als chemisches Fällungsprodukt als $Mg(OH)_2$ aus dem Meerwasser gewonnen wird, durch Trokkenpressen ohne Zusatz eines plastischen Rohstoffs hergestellt und bei Temperaturen von 1500 bis 1750°C gesintert. Dabei verfestigen sich die MgO-Körner zu einem festen Gefüge. Durch Zusatz von Chromerz entstehen Chromerz-Magnesia- bzw. Magnesia-Chromerzsteine. Auf ähnliche Weise werden feuerfeste Steine aus Forsterit ($2MgO \cdot SiO_2$) und Sinterdolomit, einem Gemisch von CaO und MgO, hergestellt. Sinterdolomit und -magnesia werden als Stampfmasse mit Teer gebunden.

Schmelzflüssig gegossene feuerfeste Erzeugnisse können nur bedingt zur Keramik gerechnet werden. Ihre Rohstoffe aus Al_2O_3, SiO_2, MgO, ZrO_2 oder Cr_2O_3 werden körnig im elektrischen Lichtbogenofen geschmolzen, in Formen gegossen und abgekühlt. Ebenfalls nicht eindeutig zur Keramik gehören die *feuerfesten Fasern*, die aus

einer Schmelze bei hohen Temperaturen erzeugt werden und als hervorragender Wärmeisolator zur Verminderung der Wärmeverluste an Öfen dienen.
Schleifscheiben werden teilweise als Keramik hergestellt, indem die Schleifkörnung aus Korund oder SiC mit einem früh sinternden Ton, Feldspat oder Glas als keramische Masse gemischt, trockengepreßt und gebrannt wird.
Säurefeste Steine werden ähnlich den Schamottesteinen hergestellt.

6.2.4. Feinkeramik

Die *Feinkeramik* erfordert eine intensivere Zerkleinerung der Rohstoffe als die Grobkeramik.
Fayence und *Majolika* sind Tonwaren mit einem porösen und farbigen Scherben. Fayence ist weiß oder farbig glasiert und bemalt oder reliefartig verziert.
Steingut besitzt einen weißen, porösen Scherben mit einer durchsichtigen Glasur. Rohstoffe sind weißbrennender Steingutton, der beim *Kalksteingut* mit Sand und Kalkstein, beim *Feldspat-* oder *Hartsteingut* mit Sand, Kaolin und Feldspat und beim *gemischten Steingut* mit Quarzsand, Feld- und Kalkspat gemischt wird. Als Magerungsmittel dient Scherbenmehl. Das Steingut wird im Tunnelofen (Abb. 6.2.4-1) gebrannt. Der Rauh- oder Verglühbrand wird bei Temperaturen von 1150 bis 1250 °C durchgeführt, der nachfolgende Glasur- oder Glattbrand bei 1000 °C. Durch den bis zu 100 m langen Brennkanal des Tunnelofens werden die Brenngutwagen hindurchgeschoben. Die heißen Ofenabgase werden zum Vorwärmen im vorderen Abschnitt genutzt. In der Mitte des Ofens erreicht das Gut die

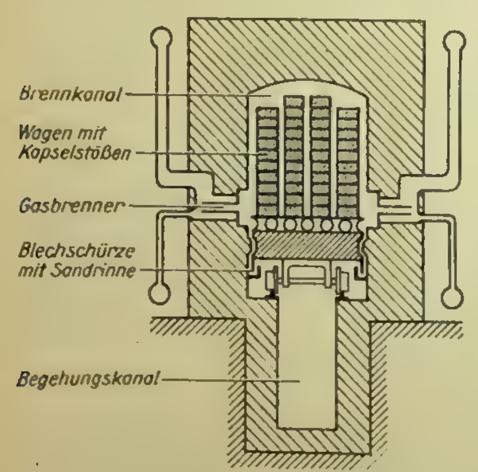


Abb. 6.2.4-1 Tunnelofen (Querschnitt durch die Brennzone)

Garbrandtemperatur und wird im hinteren Teil allmählich gekühlt. Die Brenntemperatur wird durch die Verbrennung von gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen oder durch eine elektrische Heizung erzeugt. Nach dem Rauhbrand werden auf den porösen Scherben die Dekoration und die Glasur aufgetragen oder auch farbige Engoben aufgebracht.
Feinsteinzeug ist die feinkeramische Variante des Grobsteinzeugs und besitzt einen dichten, nicht durchscheinenden, grau bis dunkel gefärbten Scherben. Aus Feinsteinzeug werden Fußbodenplatten, chemisch-technische Geräte, Haushalt- und Ziergefäße gefertigt.
Vitreous China hat gegenüber Steingut einen höheren Flußmittelgehalt, eine hohere Festigkeit und einen gesinterten Scherben. Die Glattbrandtemperatur liegt bei 1250 °C. Der Einsatz erfolgt für sanitärkeramische Erzeugnisse.
Porzellan ist die edelste Keramik mit einem weißen, dichten und durchscheinenden Scherben. Rohstoffe sind Kaolin, Quarz und Kalifeldspat, die ungefähr im Masseverhältnis von 2:1:1 zur Herstellung des *Hartporzellans* dienen. Der Verglühbrand der auf vielfältige Weise geformten Erzeugnisse erfolgt bei 900 °C, der Glattbrand bei 1400°C. Hartporzellan wird als chemischtechnisches Porzellan, Geschirr-, Zier- und Elektrokeramik verwendet. *Weichporzellan* enthält mehr Flußmittel und wird bei 1200 °C glattgebrannt. Es wird als Zierkeramik und in einigen außereuropäischen Ländern als Geschirrkeramik produziert. Es war das typische ostasiatische Porzellan.
Geschirrkeramik aus Porzellan oder Steingut wird durch Gießen oder plastische Formgebung erzeugt. Dazu werden in Großbetrieben Taktstraßen eingesetzt. Nach der Trocknung erfolgt der Brand in Tunnel- oder Herdwagenöfen. Zwischen dem Verglüh- und dem Glattbrand wird die Ware durch Tauchen, Spritzen oder Sprühen glasiert. Die Glasur schmilzt beim Glattbrand als glasiger Überzug auf die Keramik auf. Die *Unterglasurdekoration* erfolgt vor dem Glattbrand und dem Glasieren. Durch den Schutz der Glasur sind die Farben unbeschränkt haltbar. Die *Aufglasurdekoration* wird in einem dritten Brand zwischen 700 und 850 °C eingebrannt. Wegen der niedrigen Brenntemperatur steht eine größere Farbpalette als bei der Unterglasurdekoration zur Verfügung. Die Dekoration geschieht durch Handmalerei, Schiebebilder oder Sieb- und Stahldruck. Vor dem Versand wird die Geschirrkeramik geschliffen, poliert und gewaschen.
Sonderkeramik. Um speziellen Anforderungen an Werkstoffe im Hochtemperaturbereich und bei extremen chemischen Beanspruchungen zu entsprechen, wird die *Oxid-* und *Nichtoxidkeramik* hergestellt. Oxidkeramik besteht überwiegend aus einem Metalloxid. Die Formgebung der Oxidpulver erfolgt nach Zusatz eines organischen Bindemittels durch Pressen, Ziehen oder

Gießen. Der Brand wird in Kammer- oder Tunnelöfen mit unterschiedlichen Schutzgasen und Drücken durchgeführt. Hauptvertreter der Oxidkeramik ist der *Sinterkorund*.

Elektrokeramik. *Elektroporzellan* dient zur Isolierung von Hoch- oder Niederspannung und wird als Hartporzellan hergestellt. Es wird im trockenen Zustand glasiert und nur einmal im Tunnel- (Tafel 21) oder Kammerofen gebrannt.

Steatit wird aus Speckstein und wenig Ton erzeugt. Als Flußmittel dient beim Normalsteatit Feldspat, beim Sondersteatit Bariumkarbonat. Die Herstellung des Steatits ähnelt der des Porzellans. Normalsteatit wird für Niederspannungsschalterteile, Sondersteatit als Isolierstoff für die Hochfrequenztechnik verwendet. Keramische Werkstoffe auf der Basis von Magnesiumsilikaten dienen auch als Isolierstoff der Elektrowärmetechnik.

Kondensatorkeramik enthält Titanoxid. HDK-Keramik besitzt durch den Zusatz von Bariumtitanat eine *h*ohe *D*ielektrizitäts*k*onstante von 10^3 bis 10^4, NDK-Keramik eine *n*iedrige *D*ielektrizitäts*k*onstante von 10^2 bis 10^3 und besteht aus Titanoxid und Magnesiumtitanat.

Magnet- oder *Ferritkeramik* enthält Eisenoxid. Weichmagnetische (Manganzinkferrit) und hartmagnetische Ferrite (Bariumferrit) werden als Bauelemente der HF- und UHF-Technik eingesetzt.

Piezokeramik enthält Bariumtitanat oder Bleititanatzirkonat. Sie wird als elektrisches Filter und Wandler für Verzögerungsleitungen verwendet. Im großen Maße wird die Piezokeramik in der Meßtechnik zur Messung von Kräften, Drücken und Beschleunigungen angewendet. Die Grenzen der technischen Entwicklung und Anwendung sind heute noch nicht erkennbar.

Cermets oder *Mischkeramik* nennt man Werkstoffe aus Keramik und Metall. Sie verbinden die Hitzebeständigkeit, Härte, Druckfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Keramik mit der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, plastischen Verformbarkeit und Zugfestigkeit der Metalle. Die Ausgangspulver werden gemischt, gepreßt und gesintert. Oft werden Cermets heißgepreßt. Es ist auch möglich, poröse Keramik mit flüssigen Metallen zu tränken und so eine Mischkeramik herzustellen. Übliche Kombinationen sind Korund und Chrom, Titankarbid und Nickel oder *Widia* aus Wolframkarbid und Kobalt (vgl. 3.4.5.).

Faserverstärkte Keramik wird ähnlich wie die Mischkeramik gepreßt oder gegossen. Es werden sowohl metallische als auch nichtmetallische Fasern in die Keramik eingebracht. Dadurch wird insbesondere die Zugfestigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit der Keramik erhöht.

Kohlenstoff wird als keramisches Erzeugnis wegen seiner hohen thermischen und chemischen Beständigkeit angewendet. Feuerfeste Kohlenstoffsteine werden aus Koks und Teer gepreßt und bei 1200 °C gebrannt. Kunstkohle und Graphitelektroden werden ähnlich hergestellt.

Siliziumkarbidkeramik. Für den Einsatz als feuerfester Baustoff wird die SiC-Körnung mit plastischem Ton gemischt und zu Formen gepreßt. Beim Brennen und beim Einsatz entsteht auf der SiC-Oberfläche durch Oxydation eine Schicht aus SiO_2, die den Werkstoff vor einer vollständigen Oxydation schützt. Wegen der elektrischen Leitfähigkeit des SiC werden elektrische Heizleiter aus SiC mit dem Handelsnamen *Silitstäbe* hergestellt, die in oxydierender Atmosphäre bis zu einer Temperatur von 1400 °C eingesetzt werden können. Reines SiC kann durch Heißpressen oder Reaktionssintern verdichtet werden. Beim *Reaktionssintern* erhitzt man ein Gemisch aus SiC und Kohlenstoff in einem Dampf aus Silizium oder eine Mischung von SiC und Si in einer CO-Atmosphäre. Dabei bildet sich zwischen den SiC-Körnern eine SiC-Bindung, die die Körner fest verbindet und verfestigt. Auf eine ähnliche Weise läßt sich eine Bindung durch Siliziumnitrid Si_3N_4 oder Siliziumoxynitrid Si_2ON erzeugen. Solche Werkstoffe werden als Materialien mit einer hohen Festigkeit bei hohen Temperaturen als feuerfeste Baustoffe und als Konstruktionsmaterialien, z. B. für Gasturbinen, verwendet.

Reaktorkeramik. In der Reaktortechnik werden durch keramische Prozesse hergestellte Erzeugnisse als Spalt- und Brutstoffe, Moderatoren, Reflektoren, Regelstäbe und zum Strahlenschutz verwendet. Die Technologie der Herstellung von Reaktorkeramik entspricht gewöhnlich der einer speziellen Oxidkeramik. Brennelemente aus UO_2 werden durch Sintern erzeugt. Als Moderatoren und Reflektoren eignen sich BeO, Be_2C, ZrO_2 und Graphit. Regelstäbe können aus B_4C o. a. Boriden, die als Oxidkeramik oder Cermet vorliegen, hergestellt werden.

Raumfahrtkeramik. Als Raketendüsenmaterial, das Temperaturen bis zu 2800 °C und dem chemischen Angriff der Abgase widerstehen muß, werden Keramiken aus SiC und Graphit eingesetzt. Zur Wärmeisolation werden Al_2O_3, ZrO_2, poröser Graphit und poröse Karbide eingesetzt. Einem besonderen Verschleiß sind Raketenspitzen ausgesetzt, die keramisch aus ZrO_2, Graphit, SiO_2 und Al_2O_3 hergestellt werden. Keramische Überzüge auf Metallen und keramische Fasern werden im großen Maße bei Raketen angewendet.

6.3. Glas

Der Begriff Glas kennzeichnet eine große Gruppe von Werkstoffen, die sehr unterschiedliche Zusammensetzungen und sehr verschiedene Ei-

genschaften haben können. Allen gemeinsam ist, daß sie durch Schmelzen erzeugt werden, wobei die Schmelzen die Eigenschaft haben, beim Abkühlen ohne zu kristallisieren in den festen Zustand überzugehen. Vor allem die Oxide von Silizium, Bor, Phosphor und in geringerem Maße von Arsen und Germanium können leicht Gläser bilden, weil die Zähigkeit der Schmelzen dieser Oxide oberhalb des Schmelzpunkts sehr groß ist. Beim Abkühlen ist dann die Kristallisationsgeschwindigkeit so gering, daß man amorphe Werkstoffe erhält. Diese Oxide bezeichnet man auch als *Glasbildner* oder, weil sie meist ein ungeordnetes Netzwerk von Tetraedern aufbauen, als *Netzwerkbildner*. Zu den Glasbildnern können zur Verbesserung der Schmelzbarkeit, der chemischen Beständigkeit und der physikalischen Eigenschaften weitere Oxide zugegeben werden, die als *Netzwerkwandler* bezeichnet werden. Das sind vor allem die Alkali- und Erdalkalioxide. Auch andere Oxide, wie die des Aluminiums, Zinks, Bleis und Zirkons, können zur Erzielung bestimmter Eigenschaften eingebracht werden. Durch Zugabe von Oxiden der Schwermetalle, besonders Eisen, Chrom, Kobalt, Nickel und Kupfer, können farbige Gläser hergestellt werden.

Nach den Hauptbestandteilen teilt man die Gläser in verschiedene Gruppen ein, wobei die meisten Gläser als Hauptbestandteil SiO_2 (50 bis 80%) enthalten und deshalb als *Silikatgläser* bezeichnet werden. Das Glas des reinen SiO_2 wird *Kiesel-* oder *Quarzglas* genannt. Gläser mit erhöhtem Boranteil bezeichnet man als *Borosilikatgläser*. Gläser auf der Basis von Boroxid werden als *Boratgläser* bezeichnet. *Phosphatgläser* werden auf der Grundlage von Phosphorsäure produziert.

6.3.1. Rohstoffe

Der Hauptrohstoff für die meisten Gläser ist Quarzsand. Je nach Verwendungszweck des Glases werden besondere Anforderungen an den Gehalt an Fe_2O_3 u. a. Schwermineralen gestellt. Für die Herstellung von Kieselglas wird hochreiner Bergkristall verwendet. Wegen des hohen Schmelzpunkts (1710 °C) des SiO_2 ist die Herstellung des Kieselglases aufwendig und teuer. Aus diesem Grunde setzt man für die Herstellung technischer Silikatgläser Alkalioxide als Flußmittel ein. Die Alkalioxide und alle anderen Oxide sollten in einer solchen Form eingefügt werden, daß sie möglichst bei niederen Temperaturen bereits mit dem SiO_2 reagieren. Aus diesem Grunde werden hauptsächlich Karbonate, Hydroxide, Nitrate und Oxide eingesetzt (Tab. 6.3.1-1).

6.3.2. Technologie der Glasherstellung und Verarbeitung

Gemengeaufbereitung. Die natürlichen Rohstoffe Sand, Kalkstein und Dolomit werden in den Gewinnungsbetrieben meist schon aufbereitet und die Rohstoffe aus der chemischen Industrie, wie Soda oder Pottasche, in einsatzfähigem Zustand geliefert, so daß in den Gemengeanlagen der Glasindustrie im wesentlichen nur die Dosierung und Mischung der Rohstoffe erfolgt. Dabei wird zunehmend das Gemenge in automatischen Anlagen bereitet, wobei die Analyse der Rohstoffe z. T. mit Röntgenfluoreszenzapparaturen erfolgt und mit Hilfe eines Rechners über eine Korrektur der Einwaage die Zusammensetzung des Gemenges konstant gehalten wird. Zur Vermeidung der Entmischung beim Transport und beim Bunkern wird bis 5 % Wasser zugesetzt oder das Gemenge wird mit 15 % Wasser oder wäßriger Alkalihydroxidlösung pelletiert. Das Gemenge bzw. die getrockneten Pellets werden entweder mit Scherben (≈ 30 %) vermischt oder Scherben und Gemenge getrennt über eine Zwischenlagerung am Schmelzaggregat mit Hilfe von Einlegemaschinen möglichst kontinuierlich in die Schmelzwanne eingelegt. Die Scherben kommen aus dem technologisch bedingten Abfall der Produktion oder als Fremdscherben vom Altstoffhandel zum Einsatz. Dafür müssen die Scherben sortiert, gewaschen und zerkleinert (< 20 bis 30 mm) werden.

Schmelzen des Glases. Die meisten technischen Gläser werden bei 1450 bis 1600 °C in kontinuierlich arbeitenden *Wannenöfen* geschmolzen. Kleinere Mengen, vor allem Farbgläser, Bleikristallglas und optische Gläser, schmilzt man in *Hafenöfen*, die diskontinuierlich arbeiten. Den Schmelzprozeß kann man in 4 Stufen einteilen. Zunächst reagieren die Rohstoffe Soda, Kalkstein u. a. mit dem Sand (SiO_2) unter Bildung von Silikaten. Diese Stufe wird *Silikatbildung* genannt. Sie ist abgeschlossen, wenn alle Karbo-

Tab. 6.3.1-1 *Oxide im Glas und deren Ausgangsstoffe*

Bestandteil des Glases	Rohstoffe
Siliziumdioxid SiO_2	Quarzsand SiO_2
Natriumoxid Na_2O	Soda Na_2CO_3; Natronlauge $NaOH$; Natriumsulfat Na_2SO_4
Kaliumoxid K_2O	Pottasche K_2CO_3; Kalilauge KOH
Kalziumoxid CaO	Kalkstein, Kreide $CaCO_3$
Magnesiumoxid MgO	Dolomit $CaCO_3 \cdot MgCO_3$
Aluminiumoxid Al_2O_3	Tonerdehydrat $Al(OH)_3$; Feldspat $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$; Ton $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 6H_2O$
Bleioxid PbO	Mennige Pb_3O_4; Bleiglätte PbO
Zinkoxid ZnO	Zinkoxid ZnO
Boroxid B_2O_3	Borsäure H_3BO_3; Borax $Na_2B_4O_7$; Colemanit $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$

nate, Hydroxide u. a. Komponenten mit SiO_2 zu Silikaten umgesetzt sind. Da SiO_2 im Überschuß vorhanden ist, liegt dann bei 900 bis 1 000 °C Silikatschmelze vor, in der noch Blasen und kristalline Kieselsäure vorhanden sind. Nach weiterer Erhöhung der Temperatur löst sich die Kieselsäure in der Schmelze auf. Diese Phase bezeichnet man als *Restquarzlösung* oder *Rauhschmelze*. Danach erfolgt die *Läuterung*, wobei die Läutermittel Gase abspalten, die beim Aufsteigen durch die Schmelze gelöste Gase und kleine Blasen aufnehmen und aus der Schmelze entfernen. Gleichzeitig erfolgt dadurch eine Homogenisierung der Schmelze. Die Läuterung erfolgt bei der höchsten Temperatur. Das anschließende Abkühlen der Schmelze auf Verarbeitungstemperatur wird als *Abstehen* bezeichnet.
Die einzelnen Prozesse laufen in Hafenöfen nacheinander, in Wannenöfen auch nebeneinander ab. Durch das Temperaturregime im Wannenofen wird eine Strömung erzeugt, die eine Vermischung der einzelnen Zonen und damit ein Austragen ungeschmolzenen Glases verhindert (Abb. 6.3.2-1).
Wannenöfen sind meist rechteckige Herdöfen, die mit Gas, Öl oder Elektroenergie beheizt werden. Während bei flammenbeheizten Öfen die Energie im Oberofen freigesetzt und durch Strahlung und Konvektion auf die Schmelze übertragen wird, erfolgt bei der Elektroschmelze die Erhitzung direkt in der Schmelze, wobei diese selbst als Heizleiter dient.
Bei flammenbeheizten Öfen unterscheidet man nach der Art der Wärmerückgewinnung aus den Abgasen regenerativ und rekuperativ arbeitende Öfen. Während bei Regeneratorbetrieb die Flammenrichtung periodisch gewechselt wird, bleibt sie bei Rekuperatorbetrieb stabil. Die Rekuperatoren und Regeneratoren dienen bei Öl- und Starkgaseinsatz zur Vorwärmung der Verbrennungsluft. In Anlagen mit Generatorgasbeheizung wird auch das Gas in den Regeneratoren vorgewärmt.

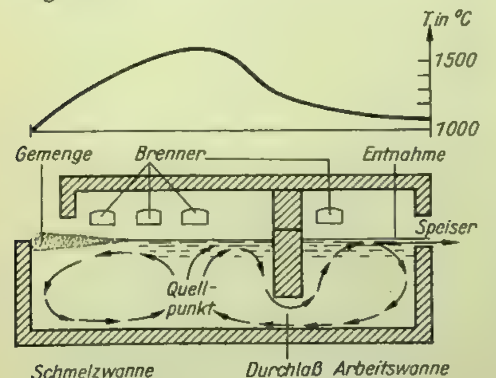


***Abb. 6.3.2-1** Temperaturprofil und Strömungsverlauf in einer querbeheizten Glasschmelzwanne*

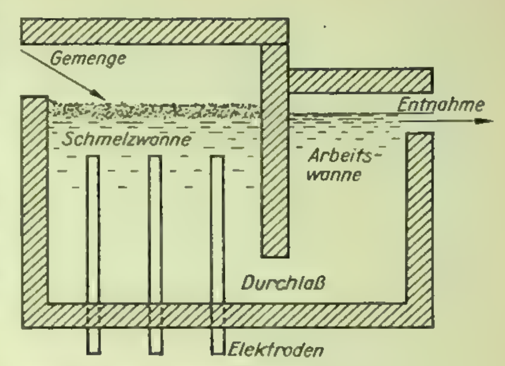


***Abb. 6.3.2-2** Vollelektrische Glasschmelzwanne*

Zur Stabilisierung des Strömungsregimes kann im Quellpunktbereich Luft eingeblasen werden. Diese Methode wird *Bubbling* genannt. Zur Erhöhung der Schmelzleistung kann sowohl im Einschmelzbereich oder auch im Läuterbereich der Wannen zusätzlich Elektroenergie über Molybdänelektroden zugeführt werden (elektrische Zusatzheizung, EZH). Diese Maßnahme stabilisiert die Strömungsverhältnisse und erhöht die Glasbadtemperatur.
Vollelektrische Schmelzwannen (Abb. 6.3.2-2) zeichnen sich dadurch aus, daß der Schmelzteil vollständig mit Gemenge bedeckt ist und die Oberofentemperaturen nur ≈ 200 °C erreichen. Die Energie wird über Elektroden aus Molybdän, Graphit oder SnO_2 eingespeist. Die Elektrodenanordnung bestimmt das Temperatur- und damit das Strömungsfeld. Bei der vollelektrischen Schmelze (VES) erreicht man höhere spezifische Schmelzleistungen als bei flammenbeheizten Öfen. Sie sind gut regelbar.
Hafenöfen sind regenerativ oder rekuperativ beheizte Öfen, in denen sich ein oder mehrere Häfen (Schamottetiegel bis 1 m Durchmesser und 1 m Höhe) befinden. Die Temperatur-Zeit-Kurve des Schmelzzyklusses wird durch die zu schmelzenden Gläser bestimmt. Es können in einem Ofen gleichzeitig auch verschiedene, ähnlich schmelzende Gläser, z. B. Farbgläser, erschmolzen werden, die gemeinsam verarbeitet werden müssen, z. B. für Überfang-Römer. Bei optischen Gläsern erfolgt in den Häfen noch eine zusätzliche Homogenisierung durch Rühren mit wassergekühlten Stahl- oder Keramikrührern.
In geringen Mengen benötigte hochreine optische Gläser und Spezialgläser werden in Platintiegeln geschmolzen, die meist induktiv erwärmt werden.
Formgebung des Glases. Sie erfolgt aus dem flüssigen Zustand. Dabei wird der für Gläser typische allmähliche Übergang vom flüssigen in den festen Zustand ausgenutzt. Glas läßt sich im

Viskositätsbereich von 10^2 bis 10^8 Ns/m^2 durch Gießen, Pressen, Blasen und Ziehen formen. Es können nicht nur Halbzeuge, sondern auch fertige Glaswaren unmittelbar aus der Schmelze hergestellt werden.

Blasen von Hohlglas. Bei der *manuellen Fertigung* wird ein flüssiger Glasposten mit der *Glasmacherpfeife* (Edelstahlrohr mit Holzgriff und verdicktem unteren Teil) aus dem Schmelzofen entnommen (angefangen) und daraus durch Wälzen auf einer Stein- oder Metallplatte, gelegentlichem Blasen in das Pfeifenrohr und Formen mit Hilfe wassergetränkter Holzlöffel das kugelförmige Külbel hergestellt. Bei großformatigen Erzeugnissen muß mehrmals angefangen werden, damit das Külbel entsprechend groß wird. Das Külbel wird dann frei oder in einer Form aus Gußeisen oder Holz zum gewünschten Gegenstand ausgeblasen.

Bei der *maschinellen Hohlglasherstellung* erfolgt die Konditionierung der Glasmasse mit Hilfe eines Speisers. Durch den Speiser wird die Glasschmelze auf Verarbeitungstemperatur abgekühlt und mit Hilfe einer speziellen Anordnung von Auslaßöffnung, bewegtem Plunger und einer Schere der Maschine Tropfen zugeführt. Die Tropfenmasse entspricht der Masse des zu fertigenden Artikels. Der Tropfen gelangt in die Vorform und wird durch Pressen, Blasen oder Saugen bzw. kombiniertem Verfahren zum Külbel vorgeformt. Bei älteren Verfahren, z. B. der *Owens-Maschine*, wurde das flüssige Glas durch Einsaugen in die Vorform direkt aus der Arbeitswanne entnommen.

Die vorgeformten Külbel werden dann in die Fertigform überführt und in der Form zur endgültigen Größe ausgeblasen (Abb. 6.3.2-3). Bei dickwandigen Erzeugnissen, wie Flaschen und Konservengläser, werden in der Vorform die Öffnung und teilweise der Halsansatz geformt. Dünnwandige Erzeugnisse werden auf Rotationsblasmaschinen gefertigt. Dabei wird das Külbel unter Drehung in der Fertigform zur endgültigen Größe ausgeblasen. Bei diesen Artikeln muß jedoch noch die Kappe (der am Blaskopf haftende Glasteil) abgesprengt oder abgeschmolzen werden. Wenn das Glas erstarrt ist, wird die Form geöffnet und der Artikel in den Kühlofen überführt.

Pressen. Dickwandige, flache Artikel, z. B. Schüsseln, optische Halbzeuge, Glasbausteine u. a., werden durch Pressen hergestellt. Mit einem *Speiser* oder manuell wird die für einen Artikel notwendige flüssige Glasmasse in die Preßform eingebracht und mit Hilfe eines Stempels in die Form gepreßt. Die Preßwerkzeuge sind aus Stahlguß und z. T. oberflächenvergütet. Von der Qualität der Oberfläche der Preßwerkzeuge und der Formgebungstemperatur ist die Oberflächenqualität der Erzeugnisse abhängig. Häufig werden die gepreßten Artikel, bevor sie in den *Kühlofen* gelangen, oberflächlich noch einmal erhitzt, um die Oberflächenqualität zu verbessern (*Feuerpolitur*).

Gießen – Walzen. Beim Gießen und Walzen von Glas werden nur geringe Kräfte aufgewendet. Wegen der hohen Zähigkeit können nur dickwandige Erzeugnisse hergestellt werden. *Guß-* oder *Walzglas* erhält man, indem flüssiges Glas auf einen vorgewärmten Tisch ausgegossen und mit einer Walze ausgewalzt wird. Beim kontinuierlichen Verfahren wird ein Band zwischen 2 wassergekühlten Walzen geformt. Man erhält so ein endloses Band, das, nachdem es eine Kühlstrecke passiert hat, zu Tafeln geschnitten wird. Durch das Einlegen von Draht erhält man *Drahtglas*, durch eine entsprechende Strukturierung der Walzen *Ornamentglas*. Das nach dem Walzen noch formbare Glasband kann aber auch durch Rollen zu U- oder L-Profilen umgeformt werden. So entsteht *Profilglas (Copilit)*, das durch die Form sehr stabil ist und sich zum Verglasen von Wänden im Industrie- und Gesellschaftsbau eignet. Wegen der rauhen Oberfläche ist es nicht klar durchsichtig.

Schleudern. Durch Schleudern können rotationssymmetrische Gegenstände vor allem größerer Abmessung, z. B. Rohrschüsse, Gefäße, Fresnellinsen u. ä., hergestellt werden. Die Formen rotieren, und durch die Zentrifugalkraft legt sich das flüssige Glas an die Form an.

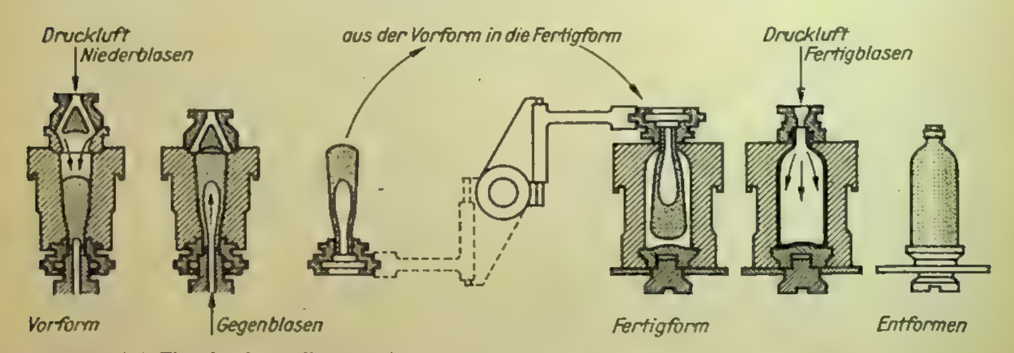


Abb. 6.3.2-3 Flaschenherstellung nach dem Blas-Blas-Verfahren

Ziehen. Ziehverfahren werden zur Herstellung von Flachglas, Rohren und Stäben sowie von Glasseide angewendet.
Flachglas wird entweder mit Hilfe einer Schlitzdüse (Fourcault-Verfahren) oder aus der freien Oberfläche (Colburn-, Pittsbourgh-Verfahren) senkrecht nach oben gezogen.
Beim *Fourcault-Verfahren* (Abb. 6.3.2-4) wird die Schlitzdüse aus Schamotte in die Glasschmelze gedrückt, so daß aus dem Schlitz Glas hervorquillt. Mit Hilfe einer Fangtafel wird ein Band gezogen, das dann durch die Transportwalzen nach oben gezogen wird. Um ein Einschnüren des Bandes zu vermeiden, müssen die *Borden* (Ränder) intensiv gekühlt werden. Über der *Ziehdüse* befinden sich *Kühlflaschen*, die das Glasband kühlen. Von der Kühlung des Bandes hängt die Leistung der Maschine ab. Es werden Ziehgeschwindigkeiten von 0,8 bis 1,6 m/min bei 2 mm Dicke erreicht. Über die Ziehgeschwindigkeit kann die Dicke des Glases beeinflußt werden. Mit steigender Ziehgeschwindigkeit nimmt die Dicke ab. Das Band passiert dann den *Ziehschacht*, wo es allmählich abgekühlt wird. Auf der *Brechbühne*, 8 bis 12 m über der Düse,

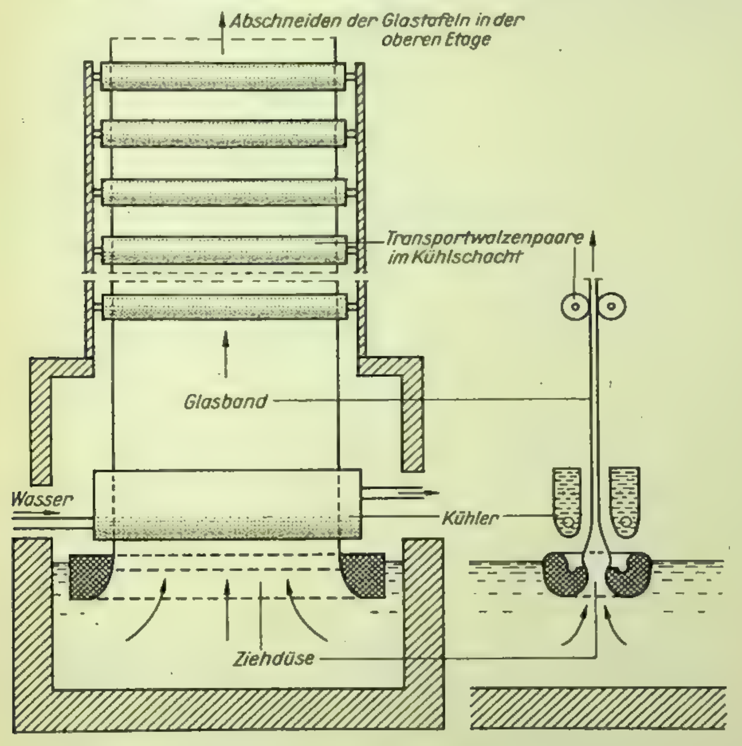


Abb. 6.3.2-4 *Maschinelles Ziehen von Tafelglas nach dem Fourcault-Verfahren*

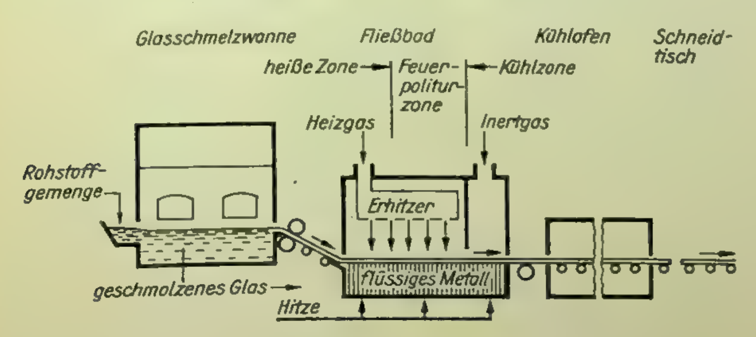


Abb. 6.3.2-5 *Float-Glas-Anlage zur Herstellung von Spiegelglas*

wird das Band in Tafeln geschnitten. Die Breite des Bandes liegt bei 1,8 bis 3 m. Beim *Pittsbourgh-Verfahren* erreicht man Ziehgeschwindigkeiten bis 2 m/min.

Ein kombiniertes Walz- und Ziehverfahren ist das *Float-Glas- (Schwimm-Glas-) Verfahren* (Abb. 6.3.2-5). Mit Hilfe zweier Walzen wird kontinuierlich ein Glasband gewalzt, das über ein Bad aus flüssigem Metall gezogen wird. Durch oberflächiges Erhitzen (Feuerpolitur) und das Schwimmen auf dem Metallbad erhält man ein Glasband mit ebenen, planparallelen Oberflächen. Durch Ziehen (Strecken) kann die Dicke des Glasbandes, die durch das Walzen relativ groß ist, vermindert werden. Dieses Verfahren gestattet es, die für die Herstellung von Spiegelglas bisher notwendige Schleif- und Polierarbeit einzusparen.

Stäbe und Rohre werden waagerecht (Danner-Verfahren), senkrecht nach oben (Schuller-Verfahren) oder nach unten gezogen. Das verbreitetste Verfahren ist das *Danner-Verfahren*. Dabei fließt das Glas aus einer Speiserrinne auf ein schrägstehendes, rotierendes Schamotterohr (Dannerpfeife). Das noch formbare Glas wird von der Pfeife abgezogen. Wird Luft in die Pfeife eingeblasen, so entstehen Rohre. Es werden Ziehgeschwindigkeiten > 100 m/min erreicht.

Glasseidenverfahren. *Glasseide* kann durch Ausziehen von Glasstäben (*Stabziehverfahren*) oder nach dem *Düsenziehverfahren* hergestellt werden. Beim *Stabziehverfahren* wird eine Batterie von Glasstäben am unteren Ende durch Gasflammen so stark erhitzt, daß Fäden gezogen werden können, die auf eine Trommel aufgewickelt werden. Beim *Düsenziehverfahren* wird in elektrisch beheizten Platinwannen Glas geschmolzen bzw. aus der Schmelzwanne durch Speiser zugeführt. Der Boden der Wanne enthält Bohrungen (Düsen), durch die das Glas ausfließt und zu Glasseide gezogen wird. Um die Weiterverarbeitung zu ermöglichen, wird auf die Fasern noch eine *Schlichte* auf der Basis von Paraffin, Gelatine, Fetten o. a. während des Ziehens aufgebracht und damit Reibung und elektrostatische Aufladung der Fasern verringert.

Glasfasern für die Herstellung von Isolierplatten und -matten sind meist Kurzfasern. Sie werden durch *Schleuder-* oder *Blasverfahren* hergestellt. Ein Strang flüssigen Glases gelangt auf mit hoher Geschwindigkeit rotierende Teller und wird zerfasert. Beim Blasverfahren wird der Strang mit Druckluft, Wasserdampf oder speziellen Brennern zerstäubt. Dabei entstehen sehr feine, jedoch unterschiedlich dicke Fasern.

Kühlen des Glases. Nach der Formgebung des Glases schließt sich eine definierte Wärmebehandlung des Glases an, das *Kühlen*, um die durch rasches, ungleichmäßiges Abkühlen der Glasartikel entstandenen Spannungen abzubauen und eine Zerstörung zu verhindern. Dazu wird der Glasgegenstand erneut bis knapp über die *Transformationstemperatur* (Temperatur des Erweichungsbeginns) erwärmt, einige Zeit bis zum Spannungsausgleich gehalten und dann langsam um 50 bis 100 °C abgekühlt. Danach kann schneller abgekühlt werden.

Bei optischen Gläsern führt man noch eine *Feinkühlung* durch, die es gestattet, durch Veränderung des strukturellen Aufbaus des Glases den Brechungsindex in bestimmtem Maße zu korrigieren. Dünnwandige Artikel und Glasfasern werden nicht gekühlt.

6.3.3. Weiterverarbeitung und Veredelung des Glases

Obwohl ein großer Anteil der Glasproduktion nach dem Kühlen als verkaufsfähige Ware vorliegt, gibt es auch Möglichkeiten, das Glas thermisch, mechanisch oder chemisch weiterzuverarbeiten bzw. den Erzeugnissen neue, bessere Eigenschaften zu verleihen. Diese Weiterverarbeitung wird auch häufig 2. Verarbeitungsstufe genannt.

Umformen. Durch Wiedererwärmen über den *Erweichungspunkt* hinaus kann Glas umgeformt werden. Tafelglas wird unter erneuter Erhitzung über Formen im Biegeofen gebogen oder gewölbt. Dabei legt sich das erweichende Glas an die Formen an. Autoscheiben werden z. B. so hergestellt. Durch Glasblasen vor der Lampe (Gebläsebrenner) werden komplizierte Glasgeräte für Labors und industrielle Anlagen durch Blasen und Verschmelzen von Halbzeugen (Rohre und Stäbe) hergestellt.

Absprengen. Das Entfernen überflüssiger Kappen von Hohlglas bzw. das Trennen von Rohren kann durch Anritzen und örtliches Erhitzen oder durch Erhitzen mit einer spitzen Flamme und Abschrecken geschehen. Die dabei entstehenden scharfen Kanten müssen durch Schleifen oder Verschmelzen in einer Gasflamme abgerundet werden.

Schneiden. Glas kann durch Diamant oder Hartmetallrädchen geritzt und dann gebrochen werden. Mit Hartmetall- und Diamantwerkzeugen läßt sich Glas auch sägen, bohren und fräsen. Diese Bearbeitungsmöglichkeiten sind vor allem in der optischen Industrie von Bedeutung.

Schleifen von Mustern (*Tiefschliff*) erfolgt mit Schleifscheiben, die entsprechend geformt werden. Ebene oder gekrümmte Flächen schleift man mit Schleifpulver. Der größte Materialabtrag wird beim *Grobschliff* erreicht, indem grobe Schleifmittel (Sand, Korund, Siliziumkarbid) verwendet werden. Danach erfolgt ein *Feinschliff* in einer oder mehreren Stufen. Das Schleifpulver muß eine sehr gleichmäßige Kornfeinheit besitzen. Einzelne große Körner führen zu Kratzern. Für Feinschleifarbeiten werden

auch Diamant und Borkarbid neben Korund und Siliziumkarbid verwendet.

Polieren. Um geschliffene Flächen durchsichtig zu machen, müssen sie poliert werden. Das kann mechanisch erfolgen, indem feinstes Eisenoxid (Polierrot), Chromoxid oder Tonerde auf rotierende Holz-, Kork- oder Filzteller aufgebracht wird und dadurch Unebenheiten abgetragen bzw. durch örtliches plastisches Fließen beseitigt werden. Außerdem kann durch oberflächliches starkes Erhitzen (*Feuerpolitur*) oder durch Ablösen der Oberflächenschicht durch ein Gemisch aus Fluß- und Schwefelsäure (*Säurepolitur*) die Oberfläche geglättet werden. Mechanisch poliert werden optische Bauelemente; säure- oder feuerpoliert wird Haushaltglas.

Gravieren erfolgt mit Kupferrädchen unter Verwendung eines mit Öl plastifizierten Schmirgels.

Ätzen. Durch ein Gemisch von verdünnter Flußsäure und Schwefel- oder Salpetersäure wird das Glas gleichmäßig aufgelöst, so daß blanke Flächen entstehen (*Blankätzung*, vgl. Säurepolitur). Alkalifluoridhaltige Lösungen greifen das Glas ungleichmäßig an, und es bilden sich matte Flächen (*Mattätzung*). Größere Flächen können so mattiert werden. Zur Dekoration von Glas wird das Glas mit Wachs überzogen bzw. bemalt. Wachsfreie Stellen werden angegriffen, so daß nach dem Entfernen der Wachsschicht Dekors vorhanden sind.

Verspiegeln kann durch Aufdampfen einer Metallschicht im Vakuum oder durch Reduktion einer ammoniakalischen Silbernitratlösung geschehen. Die Metallschicht wird durch einen Lacküberzug geschützt. Beim Aufdampfen sehr dünner Metallschichten ist das Glas noch durchsichtig, reflektiert aber sehr stark Wärmestrahlung. Das wird für die Herstellung wärmereflektierender Fensterscheiben (*Theraflex*) genutzt.

Vergüten nennt man das Aufbringen oder Einätzen von Schichten auf Linsen und Glasscheiben, die durch Interferenzwirkung reflexionsmindernd wirken. Außerdem wird der Begriff auch für die Behandlung von Glas mit SO_3-haltigen Gasen während des Kühlprozesses verwendet. Dabei verarmt die Oberfläche an Alkalioxid, und die chemische Beständigkeit wird verbessert.

Härten und Verfestigen. Durch rasches gleichmäßiges Abschrecken des über den Erweichungspunkt erhitzten Glases erzeugt man an den Oberflächen *Druckspannungsschichten* (*vorgespanntes Glas*, Abb. 6.3.3-1), wodurch höhere Festigkeit erreicht wird. Beim Abschrecken von Flachglas mit Druckluftduschen erreicht man außerdem, daß die Scheiben bei der Zerstörung Krümelbruch ergeben, so daß die Verletzungsgefahr gering ist (*Einscheibensicherheitsglas* für Fahrzeuge). Das Härten kann mit Biegen oder Wölben gekoppelt sein. Einen ähnlichen Spannungszustand wie in Abb. 6.3.3-1 und noch höhere Festigkeiten kann man durch Ionenaustausch erreichen. Dabei werden kleine Ionen, z. B. Na-Ionen, durch größere, z. B. K-Ionen, in der Oberflächenzone ausgetauscht.

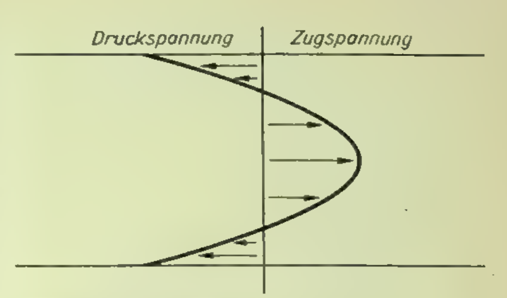


Abb. 6.3.3-1 Druck- und Zugspannung in vorgespanntem Glas

Bemalen. Glasmalfarben setzen sich aus niedrigschmelzenden Gläsern und Farboxiden zusammen. Deshalb können sie unterhalb der Erweichungstemperatur des Glases eingebrannt werden. In der Massenproduktion kann die *Handmalerei* nicht angewendet werden. Dort werden der Siebdruck (vgl. 17.2.4.) und Schiebebilder zum Aufbringen der Dekors eingesetzt.

Schäumen. *Schaumglas* wird aus gepulvertem Glas, das einen bestimmten Sulfatgehalt besitzen muß, und Kohlenstoff, meist Ruß, hergestellt. Die Pulvermischung wird in Stahlformen bis ≈ 900 °C erhitzt. Nach dem Erweichen des Glases reagiert der Kohlenstoff mit dem Sulfat unter Gasabspaltung, wodurch die Schmelze aufschäumt. Der Schaum erstarrt beim langsamen Abkühlen. Anstelle von Ruß können auch andere Mittel, die bei ≈ 900 °C Gase abspalten, genutzt werden, z. B. Kalksteinmehl.

6.3.4. Glaswerkstoffe

Die Eigenschaften der Gläser sind stark von der chemischen Zusammensetzung und in geringem Maße auch von der Herstellungstechnologie abhängig. Eine Reihe von Eigenschaften, wie z. B. *Dichte*, *Brechungsindex* und *Wärmeausdehnungskoeffizient*, können über größere Bereiche aus der Zusammensetzung berechnet werden. Es ist möglich, durch die Variation der Zusammensetzung Gläser mit bestimmten Werkstoffeigenschaften zu entwickeln. Gleichzeitig werden aber auch die technologischen Eigenschaften durch die Zusammensetzung bestimmt, so daß in der Praxis oft ein Kompromiß zwischen beiden Eigenschaftsgruppen eingegangen werden muß.

Optische und lichttechnische Eigenschaften. Die optischen Eigenschaften der Gläser beruhen auf der Wechselwirkung der Atome mit den Photonen des Lichtes. Die hohe *Lichtdurchlässigkeit*

ist die hervorstechendste Eigenschaft der Gläser. Farbloses Glas läßt bei einer Dicke von 2 mm ≈ 90% des senkrecht auftreffenden Lichtes durch. Von den restlichen 10% geht der größte Teil durch Reflexion an den Grenzflächen verloren. Die Durchlässigkeit nimmt im Bereich der IR- und UV-Strahlung stark ab. Der Bereich der Durchlässigkeit kann durch spezielle Zusammensetzung erweitert werden. So ist z. B. ein *Lithium-Beryllium-Borat-Glas* (*Lindemann-Glas*) durchlässig für Röntgenstrahlung, während ein Zusatz von Wolfram-, Blei- oder Wismutoxid in Silikatgläsern zu starker Absorption von Röntgenstrahlen führt (*Röntgenschutzgläser*). Der *Brechungsindex* und die *Dispersion* der Gläser sind vor allem für die optische Industrie von Bedeutung. Der Brechungsindex, das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu der im Medium, liegt bei Gläsern zwischen 1,3 und 2,1, bei normalen Silikatgläsern bei 1,5. Durch Barium-, Blei-, Lanthan-, Tantal- und Thalliumoxid kann der Brechungsindex erhöht werden. Unter Dispersion versteht man die Abhängigkeit des Brechungsindexes von der Wellenlänge des Lichtes.

Der Effekt der *Fototropie* wird zur Herstellung von Augenschutzgläsern genutzt. Durch elektromagnetische Strahlung ändert sich das Absorptionsspektrum silberhalogenidhaltiger Gläser. Dabei tritt bei Bestrahlung eine Eindunkelung auf. Nach Aufheben der Bestrahlung hellt sich das Glas wieder auf.

Durch Zusatz von Schwermetalloxiden (Kobalt-, Nickel-, Chrom-, Eisenoxid) kann Glas gefärbt werden. Dabei liegen die Oxide im Glas als Ionen vor. Je nach Menge und Art des Zusatzes und der Glaszusammensetzung erhält man grüne bis blaue Farbgläser. Gelbe und rote Farbgläser (Rubinglas) entstehen, wenn Gold, Kupfer, Kadmiumselenid oder -sulfid u. ä. in kolloidaler Verteilung im Glas vorliegen. Diese Gläser erhalten ihre Farbe erst nach einer definierten Wärmebehandlung, bei der die kolloidale Verteilung der Farbstoffe erst entsteht (*Anlauffarben*).

Laser-Gläser sind neodymhaltige Gläser, die durch Lichteinstrahlung spontan zu einem gebündelten kohärenten Lichtblitz (Laser-Effekt) angeregt werden.

Chemische Beständigkeit. Gläser sind gegenüber Säuren und Wasser sehr beständig, da sie bei deren Einwirkung an der Oberfläche eine *Kieselgelschutzschicht* bilden. Gegenüber Laugen ist die Beständigkeit deutlich geringer. Besonders negativ wirkt sich ein ständiger Wechsel von Säure- und Laugenangriff aus. Die höchste Widerstandsfähigkeit gegen chemischen Angriff weisen Kieselglas und kieselsäurereiche Gläser mit einem bestimmten Boranteil (*Borosilikatglas*) auf. Alle technischen Gläser werden durch Fluorwasserstoffsäure (Flußsäure) völlig aufgelöst. Lediglich Spezialgläser auf der Basis von Tonerde und Phosphorsäure (*Alumophosphatgläser*) sind gegen Flußsäure beständig.

Mechanische Festigkeit. Bei Raumtemperatur ist Glas ein spröder fester Körper, dessen Zugfestigkeit im Bereich von 70 bis 90 N/mm² liegt, während die Druckfestigkeit ≈ 900 N/mm² erreicht. Mit kleiner werdendem Querschnitt steigt die Zugfestigkeit enorm an und erreicht bei feinsten Glasfasern 2000 bis 3000 N/mm². Der Bruch geht stets von Oberflächenfehlern aus, die als Kerbstellen wirken. Durch Vermeidung von Oberflächenfehlern kann deshalb die Festigkeit von Glas erhöht werden, z. B. durch Ätzen mit einem Gemisch aus Flußsäure und Schwefelsäure oder durch thermische und chemische Druckvorspannung der Oberflächenzone.

Durch diese Maßnahmen kann die Biegefestigkeit von 30 bis 90 N/mm² bei gewöhnlichem Glas auf 300 N/mm² bei thermisch und bis zu 900 N/mm² bei chemisch gehärtetem Glas gesteigert werden.

Thermische Eigenschaften. Gläser können bis zu Temperaturen von 400 bis 600 °C, Kieselglas sogar bis ≈ 1000 °C eingesetzt werden, ohne daß Deformationen eintreten. Die Einsatztemperatur ist vom Erweichungsbeginn abhängig, die durch die chemische Zusammensetzung bestimmt wird. Zu beachten ist jedoch, daß sich Gläser beim Erwärmen mehr oder weniger stark ausdehnen, so daß die Aufheizgeschwindigkeit von der Temperaturwechselbeständigkeit abhängt und jene wiederum vom Ausdehnungskoeffizienten, der Wanddicke, der Form der Erzeugnisse und dem Spannungszustand. Fensterglas hält z. B. einen Temperaturschock von ≈ 100 °C aus, vorgespanntes Glas gleicher Zusammensetzung eine Differenz bis 400 °C. Von größter Bedeutung ist jedoch der Ausdehnungskoeffizient. Er liegt für Kieselglas bei $0,5 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$, bei Borosilikatglas bei 3 bis $5 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ und bei normalen Alkali-Kalk-Silikatgläsern bei 9 bis $10 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$, was bei einer Erhöhung der Temperatur um 50 K einer Längenausdehnung von ≈ 1 mm/m entspricht. Für den Einsatz bei höheren Temperaturen sind deshalb Kieselglas und Borosilikatglas am besten geeignet. Durch Variation der Zusammensetzung kann der Ausdehnungskoeffizient der Gläser den Erfordernissen angepaßt werden, z. B. für Gläser, die mit Metallen oder Keramik verbunden werden müssen (Elektronenröhren, Glühlampen).

Elektrische Eigenschaften. Bei Zimmertemperatur sind Gläser hervorragende Isolatoren. Der spezifische Widerstand liegt zwischen 10^{10} und $10^{19}\ \Omega \cdot cm$. Mit steigender Temperatur nimmt der spezifische Widerstand jedoch stark ab und erreicht bei Schmelztemperatur Werte unter $1\ \Omega \cdot cm$, so daß die Leitfähigkeit ausreicht, um die Glasschmelze als Heizleiter bei der Herstellung von Glas zu nutzen (vgl. 6.3.2.). Der La-

dungstransport erfolgt dabei durch Ionen. Bei Gläsern für die Elektrotechnik wird die Temperatur angegeben, bei der das Glas den spezifischen Widerstand $10^8\,\Omega \cdot cm$ besitzt. Sie liegt bei 200 bis 400 °C.

In jüngster Zeit haben auch Spezialgläser in der Elektrotechnik Verwendung gefunden, die durch den Einbau von Elementen, die leicht ihre Wertigkeit wechseln, z. B. Eisen, Vanadin, Mangan, auch bei Normaltemperatur geringe spezifische Widerstände haben ($10^3\,\Omega \cdot cm$) bzw. Halbleitereigenschaften zeigen.

Glassorten. Die Gläser können sowohl nach der chemischen Zusammensetzung als auch nach dem Einsatz eingeteilt werden.

Kieselglas ist das Glas des reinen SiO_2. Es besitzt einen geringen Ausdehnungskoeffizienten, eine gute Temperaturwechselfestigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit ($> 10^3$ °C) und ist durchlässig für UV-Strahlung. Eingesetzt wird es für Laborgeräte, Brenner für Hochdrucklampen und in der Optik. Einer breiteren Anwendung stehen die hohen Schmelzkosten entgegen.

Wasserglas besteht aus SiO_2 und Alkalioxid. Durch das Alkalioxid wird der Schmelzpunkt des SiO_2 erniedrigt und die chemische Beständigkeit so stark verringert, daß das Glas in Wasser aufgelöst werden kann. Es wird in wäßriger Lösung als Klebe- und Bindemittel eingesetzt.

Alkali-Erdalkali-Silikatgläser enthalten neben SiO_2 Alkalioxide zur Herabsetzung der Schmelztemperatur und Erdalkalioxide, die dem Glas eine gute chemische Beständigkeit verleihen. Diese Gläser enthalten $\approx 70\%$ SiO_2, 15% Alkalioxide und 15% Erdalkalioxide, teilweise auch Aluminiumoxid u. a. Diese Gläser sind die technischen Massengläser und werden für Behälter, Haushaltglas, Bauglas, Glasfasern und auch in der Optik und Elektrotechnik eingesetzt.

Borosilikatgläser enthalten bis 20% Boroxid. Dadurch kann der Alkali- und Erdalkaligehalt der Gläser gering sein und die chemische Beständigkeit und die Temperaturwechselfestigkeit werden verbessert. Diese Gläser werden für chemisch-technische Anlagen, Rohrleitungen, Laborgeräte sowie Haushaltgeräte hergestellt, z. B. *Rasotherm (Jenaer Glas).*

Bleigläser besitzen einen Bleioxid-Anteil bis zu 30%. Dadurch wird in Silikatgläsern der Brechungsindex, die Schmelzbarkeit und der spezifische elektrische Widerstand verbessert, so daß diese Gläser vor allem für die Optik, Elektroindustrie und als *Bleikristallglas* (18 bzw. 23% Bleioxid) verwendet werden.

Alumosilikatgläser enthalten einen hohen Anteil von Aluminiumoxid bei niedrigem Alkaligehalt. Dadurch erweichen diese Gläser erst bei höheren Temperaturen, so daß sie bis ≈ 600 °C verwendbar sind, z. B. für Thermometer und Hochleistungslampen.

Trüb-, Opal-Glas enthält feindisperse Kristalle (Fluoride, Arsenate, Phosphate), die einen anderen Brechungsindex als das Grundglas aufweisen und das durchgehende Licht streuen. Das Glas ist dadurch getrübt und wird für Lampenschirme, Fenster u. a. eingesetzt.

E-Glas ist ein alkalifreies Glas für die Herstellung von Glasseide, das ursprünglich als Isolationsmaterial für die Elektrotechnik entwickelt wurde. Es enthält SiO_2, Bor-, Aluminium- und Kalziumoxid. Es ist chemisch beständig und zur Bewehrung von Kunststoffen u. a. geeignet.

Vitrokeramik (Glaskeramik, Sitalle, Pyrokeram). Man versteht darunter eine große Gruppe von Werkstoffen, die wie Gläser hergestellt werden. Sie werden jedoch nach der Formgebung noch einem definierten Temperprozeß unterworfen, wobei sie teilweise oder vollständig kristallisieren und spezielle Eigenschaften erhalten. Zur Steuerung der Kristallisation werden Keimbildner zugesetzt. Häufig dienen als Rohstoffe metallurgische Schlacken.

Einige Vitrokerame können mechanisch wie Metalle bearbeitet werden. Der Einsatz ist sehr vielfältig, z. B. für Maschinenteile, Uhrenlager, Verschleißteile, Rohre, Behälterauskleidungen, Wandverkleidungen u. a.

Ausgewählte Glaserzeugnisse. *Optisches Glas* wird zur Herstellung optischer Bauelemente genutzt. Neben den obengenannten Glastypen werden noch eine ganze Palette weiterer Gläser hergestellt. So gestatteten es die Einführung seltener Erden und die Entwicklung nichtsilikatischer Gläser, optische Gläser mit extremen Eigenschaften herzustellen, nachdem von *Schott, Abbe* und *Zeiss* die Grundlagen dafür geschaffen wurden. Optische Gläser zeichnen sich durch extrem hohe *Lichtdurchlässigkeit* (Reinheit) aus und werden durch den *Brechungsindex* n_e, die *Abbe-Zahl* ν_e und die *Teildispersion* gekennzeichnet.

Technisches Glas. Dazu gehört eine große Gruppe von Erzeugnissen, die in der Elektroindustrie, Elektronik, Chemie u. a. Bereichen eingesetzt werden. Sie werden häufig als Halbzeuge (Rohre, Stäbe) hergestellt und in anderen Industriezweigen verarbeitet. Eine spezielle Gruppe sind *Lötgläser* zum Verbinden von Keramik, Glas und Metallen, *Einschmelz-* und *Zwischengläser* zur Herstellung vakuumdichter Metalldurchführungen durch Glas. Zum *Haushalts-* und *Verpackungsglas* gehören Glaserzeugnisse für den Haushalt, zum Verpacken von Lebensmitteln (Konservengläser, Flaschen) sowie Beleuchtungsglas und Ziergläser.

Bauglas (vgl. 15.2.1.) umfaßt neben Flach-, Spiegel-, Ornamentglas, Glasbausteinen und Schaumglas in zunehmendem Maße auch Produkte der Weiterverarbeitung, die sich durch besondere raumklimatisierende Eigenschaften auszeichnen, z. B. *Thermoscheiben.* Sie bestehen aus 2 oder 3 Scheiben, die in einem bestimmten Abstand dauerhaft miteinander

verbunden und mit trockener Luft gefüllt werden. So erhält man Fenster, die nicht beschlagen und eine gute Schall- und Wärmedämmung besitzen.
Sicherheitsglas dient zur Fahrzeugverglasung, als Fassadenelement u. a. Man unterscheidet *Einscheibensicherheitsglas (ESG)*, das durch Härten hergestellt wird (vgl. 6.3.3.) und *Mehrscheibensicherheitsglas (MSG)*, wobei 2 oder mehr Scheiben mit einer Plastfolie verbunden werden. Bei Zerstörung werden beim MSG die Splitter durch die Plastfolie gehalten, und beim ESG entstehen kleine stumpfe Splitter, die nur eine geringe Verletzungsgefahr darstellen.
Glasfasern sind 2 bis 20 μm dicke Fasern begrenzter Länge (bis 120 mm). Sie werden als Filz, Platten, Vlies, Glasmatte oder -wolle vor allem zur Wärme- und Schallisolation verwendet. *Glasseide* sind endlos gezogene *Elementarfäden* von 5 bis 12 μm Dicke. Sie werden zu *Rovings* (Strängen) sowie *Garnen* und *Zwirnen* weiterverarbeitet. Glasseide dient vor allem der Bewehrung von Kunststoff u. a. Baustoffen oder wird textil zu Stoffen und Geweben, z. B. für nichtbrennbare Dekorationsstoffe, Filtertücher und Elektroisolationsmaterial, eingesetzt. *Kieselglasfasern* können bis 10^3 °C verwendet werden, *E-Glasseide* bis 500 °C. Eine Spezialanwendung von unmantelten Glasfasern sind *Licht-* und *Bildleitkabel* (vgl. 11.4.) in der Optik und Elektronik. Lichtimpulse können dabei durch fortlaufende Totalreflexion zwischen Kern und Mantel auch über gekrümmte Strecken transportiert werden.

6.4. Email

Emails sind glasige, silikatische Überzüge auf Metall. Die Überzüge dienen dem Oberflächenschutz und der ästhetischen Gestaltung. Wegen der guten Beständigkeit des Emails gegenüber Säuren und Wasser lassen sich emaillierte Gegenstände leicht reinigen. Die Laugenbeständigkeit dagegen ist gering.
Trübungsmittel, wie Fluoride, Zinnoxid, Zinkoxid und Farboxide, werden zur Färbung der Emails eingesetzt. Durch die Zusammensetzung des Emails muß erreicht werden, daß bei Temperaturen < 900 °C ein Schmelzfluß entsteht, der das Metall gut benetzt und fest darauf haftet. Die wichtigste Voraussetzung dafür ist, daß Email und Metall im Wärmeausdehnungskoeffizienten übereinstimmen. Außerdem soll eine gute chemische Beständigkeit erreicht werden. Zur Erreichung dieser Ziele müssen Kompromisse eingegangen werden, was auch in der großen Zahl der eingeführten Komponenten seinen Ausdruck findet.
Durch die Variation der chemischen Zusammensetzung kann das Email auch dem Verwendungszweck angepaßt werden; z. B. stehen bei Haushaltgegenständen die Schlagfestigkeit und die Beständigkeit gegen Fruchtsäuren und Waschlaugen, bei Architekturemail die Farbe und ein geringer Glanz und bei Emails für chemischtechnische Anlagen die chemische Beständigkeit im Vordergrund (Tab. 6.4.0-1).
Die Emaillierung wird meist in 2 Schichten, *Grund-* und *Deckemail*, ausgeführt. Dabei hat das Grundemail die Aufgabe, eine gute Haftung auf dem Metall zu erreichen. Durch die Blechvorbehandlung und die Reaktion von Metall und Emailschmelze entsteht eine korrodierte Oberfläche und damit eine Verzahnung zwischen Metall und Emailschicht. Diese Verzahnung gewährleistet überwiegend die Haftung, die besonders durch einen Zusatz von Kobalt oder Nickeloxid (< 1 %) entsteht. Das Deckemail gibt dem Erzeugnis die chemische Beständigkeit und das Aussehen. Da die Schlagfestigkeit des Emails mit steigender Dicke abnimmt, wird angestrebt, möglichst dünne Schichten aufzutragen, z. B. durch *Direktemaillierung*, wobei Deckemail di-

Tab. 6.4.0-1 *Die Hauptbestandteile der verschiedenen Emails und deren Einfluß auf die Eigenschaften*

Emailbestandteile	Rohstoff	Eigenschaft
Siliziumdioxid SiO_2	Quarzsand, Feldspat	gute chemische Beständigkeit, geringe Ausdehnung, hoher Schmelzpunkt
Boroxid B_2O_3	Borax Borate	senkt die Schmelztemperatur, gute chemische Beständigkeit
Natriumoxid Na_2O	Soda Feldspat	senkt die Schmelztemperatur, erhöht die Wärmedehnung, schlechte chemische Beständigkeit
Kaliumoxid K_2O	Pottasche Feldspat	wie Na_2O
Kalziumoxid CaO	Kalkstein	senkt die Schmelztemperatur, erhöht die Wärmedehnung
Magnesiumoxid MgO	Dolomit	wie CaO
Bariumoxid BaO	Bariumcarbonat	kann PbO ersetzen, schmilzt aber schlechter
Bleioxid PbO	Bleimennige	leichtes Schmelzen, gute Verarbeitbarkeit
Aluminiumoxid Al_2O_3	Feldspat Kaolin, Ton	gute chemische Beständigkeit, erhöht die Zähigkeit der Schmelze
Zirkonoxid ZrO_2	Zirkonsilikat	verbessert die Laugenbeständigkeit
Titanoxid TiO_2	Titandioxid	gute chemische Beständigkeit, Weißtrübung
Kobaltoxid CoO	Kobaltoxid	Haftung der Grundemails wird ermöglicht, färbt blau
Nickeloxid NiO	Nickeloxid	wie CoO, färbt grün

rekt auf vorbehandeltes Blech aufgetragen wird.

Für dekorative Zwecke werden auch Aluminium zur Sichtflächengestaltung, Kupfer, Gold u. a. emailliert. Die Schmelztemperatur und der Ausdehnungskoeffizient der Schmuckemails müssen der Metallunterlage angepaßt werden. Es wird kein Grundemail benötigt. Die chemische Beständigkeit dieser Schmelzemails ist in der Regel geringer als bei Stahlblechemails.

Herstellung des Emails. Zur Verbesserung des Aufschmelzverhaltens des Emails und zum Überführen der wasserlöslichen Komponenten in unlösliche wird der größte Teil des Versatzes in *Trommel-* oder *Wannenöfen* geschmolzen und zur Verbesserung der Mahlbarkeit in Wasser abgeschreckt. Dabei erfolgt eine *Granulierung*, und man erhält die *Fritte*. Je nach Auftragungsverfahren wird die getrocknete Fritte mit den restlichen Komponenten naß oder trocken gemahlen. Beim Trockenmahlen erhält man ein *Puder*, beim Naßmahlen einen *Emailschlicker*. Der Schlicker muß eine bestimmte Konsistenz besitzen, dazu werden *Ton* (Emaillierton) und *Stellmittel* (Soda, Wasserglas) zugegeben.

Vorbehandlung des Metalls. Zum Emaillieren eignen sich kohlenstoffarme *Tiefziehbleche* und *Gußeisen*. Die Bleche werden nach der Formgebung von Fettresten durch Waschen befreit. Angerostete Bleche müssen geglüht und danach mit 10%iger Salz- oder Schwefelsäure oder deren Mischung gebeizt werden; dadurch wird der Zunder entfernt. Die Bleche werden gewaschen, mit heißer Sodalösung neutralisiert und getrocknet.

Gußeisen wird geglüht und danach durch Sandstrahlen gereinigt. Für die Direktemaillierung eignen sich nur Bleche mit sehr geringem Kohlenstoffgehalt ($< 0,005\,\%$).

Diese Bleche werden nach dem Beizen, durch das die Oberfläche bereits aufgerauht wird, mit einem sehr dünnen Nickelfilm überzogen (*Nikkel-Dip*). Dazu wird aus Nickelsulfatlösungen auf chemischem oder elektrischem Wege Nickel auf der Blechoberfläche abgeschieden. Die Bleche werden anschließend neutralisiert. Die Nikkelschicht hat dabei die Aufgabe, die Haftung zwischen Metall und Deckemail herbeizuführen und Emaillierfehler, die durch die Blechqualität entstehen können, zu vermeiden.

Auftragen des Emails. Die Emails für die *Blechemaillierung* werden im Naß-, für Gußeisen auch im Trockenverfahren, aufgetragen, wobei das *Tauchverfahren* und das *Begießverfahren* am gebräuchlichsten sind. Bei großen Gegenständen und mehrfarbig dekorierten Erzeugnissen wendet man das *Spritzverfahren* an, bei dem der Schlicker durch Druckluft zerstäubt und aufgetragen wird. Einen gleichmäßigen Auftrag in dünner Schicht auf ebenen Blechen erreicht man durch *elektrophoretischen Auftrag* oder durch *Spritzen im elektrischen Feld*. Das Trockenverfahren wendet man bei der Emaillierung großer Gußteile, wie Badewannen, chemische Apparate u. a., an. Dazu wird das Gußstück auf $10^3\,°C$ aufgeheizt und danach das Emailpuder aufgestreut. Dabei sintert und schmilzt das Email auf der Oberfläche. Nachdem das Grundemail aufgetragen ist, erfolgt das Einbrennen im Ofen und danach das Auftragen des Deckemails.

Einbrennen des Emails. Die Emails werden bei Temperaturen von 700 bis 1000 °C eingebrannt. Die *Einbrenntemperaturen* der Grundemails liegen um 30 bis 70 °C höher als die der Deckemails. Dadurch wird verhindert, daß die Schichten sich mischen und Fehler entstehen. Das Brennen erfolgt entweder im *Muffel-* oder im *Umkehrofen*. Der Muffelofen wird auf Brenntemperatur gehalten, und mit Hilfe eines Gestells werden die zu brennenden Gegenstände eingefahren. Das Einbrennen dauert bei Blechemail 3 bis 10 min, bei Gußemail 15 bis 30 min. Die Brennatmosphäre muß oxydierend sein. Beim Umkehrofen wird kontinuierlich gearbeitet. An eine endlose Transportkette, die sich oberhalb des Ofens befindet, werden die Gegenstände aufgehangen und durch den Ofen gefördert. Dabei wärmt die gebrannte Ware die zu brennende Ware vor, so daß eine bessere Energieausnutzung erreicht wird. Die Blechgegenstände können bei Temperaturen oberhalb 500 °C noch gerichtet werden, ohne daß im Email Risse auftreten.

7. Holz-, Zellstoff- und Papiertechnik

Zur Holz-, Zellstoff- und Papiertechnik zählen alle verarbeitungs- und verfahrenstechnischen Prozesse, die von Holz oder davon abgeleiteten Stoffen ausgehen.

7.1. Holz als Rohstoff

Holz ist ein Rohstoff, der zeitlich unbegrenzt in einer jährlich bestimmten Menge verfügbar ist. Es ist Ausgangsprodukt für vielfältige Roh- und Werkstoffe sowie Fertigerzeugnisse (u. a. Möbel, Bauelemente und Papier). Der jährliche Holzeinschlag in der Welt beträgt über $1,2 \cdot 10^9$ Festmeter (fm) und ist bei gegenwärtig steigender Tendenz keinen zu großen Schwankungen unterworfen.
Aufgrund der volkswirtschaftlichen Bedeutung der Erzeugnisse aus Holz, der umweltfreundlich möglichen Holzwerkstofferzeugung und -verarbeitung sowie der zunehmenden Möglichkeiten, Holzreste und verschlissene Erzeugnisse aus Holzwerkstoffen ökonomisch als Sekundärrohstoffe zu nutzen, wird Holz auch in Zukunft einer der bedeutendsten Rohstoffe bleiben. Im Weltmaßstab nimmt Holz, bezogen auf das Aufkommen in Tonnen, seit 1965 nach Kohle und Erdöl den dritten Platz ein.
Entsprechend ihrem Verwendungszweck werden unter Berücksichtigung der Holzarten Rohholz-Sortengruppen gebildet, die sich durch ihre Qualität und Abmessungen voneinander unterscheiden (Tab. 7.1.0-1). Die Eignung der Holzarten für eine bestimmte Verwendung ergibt sich aus ihren anatomischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften.

7.1.1. Anatomischer Bau des Holzes

Äußere Gestalt. Die oberirdische Holzmasse eines Baumes gliedert sich in Stamm und Äste, die unterirdischen in Wurzelstock und Wurzeln. Technisch genutzt wird hauptsächlich der Stamm. Die Nutzung der gesamten übrigen Biomasse gewinnt zunehmend an Bedeutung. Für die Nutzung des Stammes ist neben den Abmessungen sowie äußerlich sichtbaren Qualitätsmerkmalen, wie Äste, Risse und Fäulnis, insbesondere seine Form bestimmend. Sie wird durch die *Abholzigkeit* (Abnahme des Durchmessers in cm/m nach dem sog. Zopfende [Kronenende] zu), die *Krummschäftigkeit* und die *Unrundheit* bestimmt. Abweichungen von der idealgeometrischen Form sollten möglichst klein sein.
Makroskopischer Bau. Die an einem gefällten Stamm erkennbaren Strukturbestandteile sind (Abb. 7.1.1-1) das *Mark*, der aus Jahrringen zusammengesetzte *Holzkörper*, das aus lebenden, teilungsfähigen Zellen bestehende *Kambium*, die innere *lebende* (*saftführende*) *Rinde* (*Bast*) und die äußere *tote Rinde* (*Borke*). Der innere Teil des Stammes, der *Kern*, weist oft eine dunklere Farbe gegenüber der äußeren Zone,

Tab. 7.1.0-1 *Wichtige Sortengruppen des Rohholzes*

Sortengruppe und Verwendungszweck	Qualität	Mindestlänge in m	Mindestdurchmesser in cm
Furnier- und Klangholz für die Furnier- und Musikinstrumenteherstellung	hohe Anforderung an Astfreiheit, Farbe, Krümmung u. a.	1,6 · · · 3,0	25 · · · 35
Sägeholz für die Schnittholzherstellung	mittlere Anforderungen	3,0 im Durchschnitt 12,0	15 oder 20 je nach Holzartengruppe
Schichtnutzholz für die Herstellung von Span- und Faserplatten sowie Zellstoff und Papier	geringe Anforderungen	1 oder 2	4 · · · 50 (20 cm auch gespalten)
Brennholz	keine Anforderungen	1	–

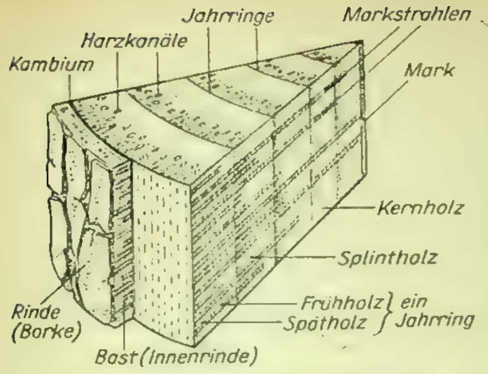


Abb. 7.1.1-1 Strukturbestandteile des Holzes (Keilstück)

dem *Splint*, auf. Dieser Farbunterschied resultiert daraus, daß die äußeren Stammteile vorwiegend dem Nährstofftransport dienen, im Stamminneren dagegen Harze, Gerbstoffe u. ä. Zellinhaltsstoffe abgelagert werden, deren Oxydationsprodukte oftmals eine auffallende Dunkelfärbung bewirken. Man unterscheidet zwischen 3 charakteristischen Stammschnitten: dem zur Stammachse rechtwinkligen *Quer-* oder *Hirnschnitt*, dem durch Längsachse und Stammdurchmesser bestimmten *Radial-* oder *Spiegelschnitt* und dem durch eine Sehne des Stammkreises parallel zur Stammachse geführten *Tangential-* oder *Fladerschnitt*.

Mikroskopischer Bau. Die *Holzzelle* besteht aus der mehrschichtig aufgebauten *Zellwand* und dem *Zellhohlraum* (*Lumen*). Sie dient der Wasserleitung (*Leitungstracheiden* bei Nadelholz bzw. *Gefäße* bei Laubholz), der Festigkeit des Holzgefüges (*Festigungstracheiden*. *Holz-* oder *Libriformfasern*) oder der Speicherung von Nährstoffen (*Holzparenchym* und *Markstrahlen*). Das zu Beginn der Wachstumsperiode (Mai bis August) gebildete *Frühholz* ist dünnwandig und weitlumig, das später entstandene *Spätholz* dagegen dickwandig und englumig. Verbindende Schicht zwischen den axial (in Richtung der Stammachse) angeordneten Zellen ist die *Mittellamelle*. Oftmals besteht zwischen Früh- und Spätholz ein deutlicher Farbunterschied (Frühholz hell, Spätholz dunkel).

Der Jahreszuwachs erscheint als konzentrisch zur Stammachse verlaufender Ring (*Jahrring*). Das Baumalter kann damit genau ermittelt werden.

7.1.2. Chemische Zusammensetzung des Holzes

Die Holztrockensubstanz besteht hauptsächlich aus Holozellulose (Zellulose und Holzpolyosen), Lignin und Extraktstoffen.

Zellulose (40 bis 50% der Holztrockensubstanz) besteht aus Makromolekülen; ihr einfachster Baustein ist die *Glukose* (Traubenzucker) bzw. die aus 2 Glukoseresten zusammengesetzte *Zellobiose*. Die kettenförmigen Zellulosemoleküle lagern sich in Bündeln (Mizellen) parallel aneinander; diese bilden ihrerseits durch Nebeneinanderlagern größere Baueinheiten (Fibrillen und Lamellen), die in ihrer Gesamtheit die Zellwand der Zellulosefaser ergeben. Infolge ihrer hervorragenden Festigkeit wird sie technisch für die Erzeugung von Papier (vgl. 7.4.) und Chemiefasern (vgl. 4.10.5.) genutzt. Großtechnisch aus Holz gewonnene Zellulose wird als Zellstoff bezeichnet.

Holzpolyosen (20 bis 28%) und *Lignin* (22 bis 30% der Holztrockensubstanz) sind die beim Verholzungsvorgang entscheidenden Kitt- und Stützsubstanzen, die sich in die Hohlräume zwischen den Mizellen und Lamellen einlagern.

Extraktstoffe des Holzes sind Harze, Fette, Wachse, Gerb- und Mineralstoffe, deren Anteile unterschiedlich und häufig spezifisch für bestimmte Holzarten sind.

7.1.3. Ausgewählte physikalische Eigenschaften des Holzes

Rohdichte. Die Masse wird bei bestimmter Feuchtigkeit auf das dabei gegebene Volumen bezogen. ϱ_0 ist die *Darrdichte* (trockenes Holz). Die Dichte der Zellwandsubstanz, die *Reindichte*, beträgt für alle Holzarten $\approx 1\,500$ kg/m^3.

Hygroskopisches Verhalten. Zwischen der Feuchtigkeit des Holzes und der relativen Feuchtigkeit der umgebenden Luft stellt sich ein hygroskopisches Gleichgewicht ein, das auch von der Temperatur abhängig ist. Im saftfrischen Zustand beträgt die auf die Darrmasse bezogene Feuchte $u = 30$ bis 70% im Kern und $u = 70$ bis 140% im Splint. Bei $u = 12$ bis 20% ist in unseren Breiten die Lufttrockenheit erreicht. Die Gebrauchsfeuchte liegt bei $u = 12$%. Beim Trocknen verdampft zunächst das in den Zellhohlräumen befindliche tropfbare Wasser. Bei $u \approx 30$% sind die Zellwände wassergesättigt (*Fasersättigungspunkt*). Weiterer Wasserentzug ist mit Volumenschwindung verbunden.

Die *Schwindung* (bzw. Quellung bei Wasseraufnahme von 0 bis 30%) ist linear von der Feuchte abhängig und in den Hauptrichtungen des Holzes unterschiedlich. Die Maßänderungen betragen:

in Längsrichtung	0,05 bis 0,07%
in Radialrichtung	2,2 bis 5,2% (Nadelholz)
	1,2 bis 8,5% (Laubholz)
in Tangentialrichtung	4,0 bis 9,0% (Nadelholz)
	3,0 bis 16,0% (Laubholz)

Festigkeit und Elastizität. Holz ist, bezogen auf seine relativ geringe Dichte, ein sehr fester Werkstoff (Tab. 7.1.3-1). Seine Reißlänge ist mit 10 bis 30 km größer als die von Baustahl mit 4 bis 8 km. Die Festigkeit des Holzes nimmt mit sinkender Dichte und steigender Feuchte ab. Bei $u = 40\%$ betragen die Zugfestigkeit nur zwei Drittel und die Biegefestigkeit nur die Hälfte ihrer Werte bei $u = 12\%$. Auch die Faserrichtung beeinflußt die Festigkeit. Zug-, Druck- und Biegefestigkeit betragen quer zur Faser nur 0,1 bis 0,2 ihrer Werte in Faserrichtung. Aufgrund von Wachstumsunregelmäßigkeiten u. a. Holzfehlern sowie um das Kriechverhalten zu berücksichtigen, liegen die zulässigen Festigkeiten im Holzbau niedriger ($\sigma_{zul} \approx 10$ N/mm²). Holz ist ein elastischer Körper, d. h., es gilt das Hookesche Gesetz. Allerdings verringert sich der Elastizitätsmodul unter Last, um nach einiger Zeit seinen Endwert anzunehmen. Das Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen ist noch ungenügend erforscht.

Tab. 7.1.3-1 *Physikalisch-technische Eigenschaften einiger Hölzer*

Holzart	Dichte in g/cm³	Zugfestigkeit in N/mm²	Druckfestigkeit in N/mm²	Biegefestigkeit in N/mm²
Kiefer	0,52	104	55	100
Fichte	0,47	90	50	78
Rotbuche	0,72	135	62	125
Eiche	0,69	90	63	100

7.2. Grundprozesse der Holzwerkstofftechnik

7.2.1. Mechanische Bearbeitung

Jegliche Rohholzverwertung setzt Trennvorgänge voraus. Dadurch werden entweder geometrisch vorbestimmte Teile oder Partikeln (Späne, Hackschnitzel) hergestellt. Diese Partikeln dienen dem Erzeugen von platten- und profilförmigen Holzwerkstoffen sowie Formkörpern oder dem chemischen Aufschluß. Die Trennvorgängen werden durch mechanisches Zerteilen und Spanen (vgl. 8.3.) bewirkt.

Entsprechend der Anisotropie des Holzes gibt es 3 Schnittrichtungen mit unterschiedlicher Spanbildung und Schnittkraft F_s (Abb. 7.2.1-1). Aufgrund des Holzaufbaus, der z. B. beim Fräsen und Kreissägen bogenförmigen Schnittrichtung und der gewünschten Form des Werkstücks können sie nur annähernd realisiert werden. Für jeden Bearbeitungsfall ergeben sich unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften, der Schnittrichtung und der Abhängigkeiten der Ziel- und Einflußgrößen untereinander optimale Bedingungen. In Tab. 7.2.1-2 sind die entsprechenden Parameter für einige Verfahren dargestellt.

7.2.2. Trocknung

Aufgrund des Unterschieds zwischen seiner Feuchtigkeit im frischen und im Gebrauchszustand muß Holz getrocknet werden. Dies gilt

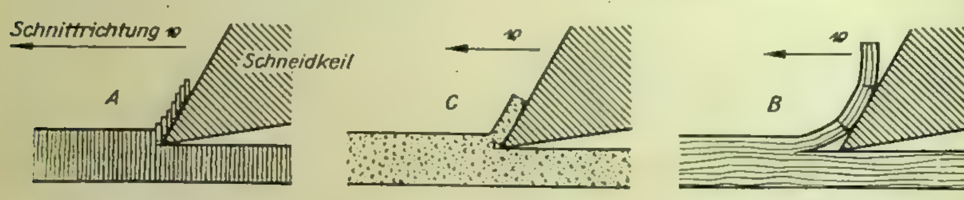


Abb. 7.2.1-1 *Schnittrichtungen bei der mechanischen Be- und Verarbeitung von Vollholz*

Tab. 7.2.1-2 *Wichtige Kenngrößen einiger Holzbearbeitungsverfahren*

	Kreissägen	Gattersägen	Fräsen
Drehzahl in U/min	3000 ··· 4000	270 ··· 340	3000 ··· 9000 ··· (24000 nur bei kleinen Durchmessern)
Schnittgeschwindigkeit in m/s	20 ··· 90	≈ 5,5	20 ··· 70
Vorschubgeschwindigkeit in m/min	bis 120	5 (max. 35)	5 ··· 50
Antriebsleistung in kW	2 ··· 60	30 ··· 120	2 ··· 70
spezifische Schnittkraft in N/mm²	40 ··· 80	40	20 ··· 100

sowohl für Schnittholz als auch für Partikeln, die in Holzwerkstoffe eingehen. Das im Holz befindliche Wasser wird verdunstet oder verdampft und in dieser Form aus dem Holzverband entfernt. Bei der Verdunstungstrocknung, die sowohl als Freiluft- als auch Kammertrocknung durchgeführt werden kann, liegen die Trocknungstemperaturen unter 100°C, bei der Verdampfungstrocknung bei ≈ 115°C. Die Erwärmung des Holzes geschieht hauptsächlich durch Konvektion, seltener durch mechanischen Kontakt, Strahlung oder dielektrisch (Hochfrequenztrocknung). Als Trocknungsmedien dienen Luft (klassische Holztrocknung unter 100°C), Rauchgase (Trocknung von Partikeln) und Heißdampf (Hochtemperaturtrocknung), mitunter auch heiße Öle.

Schnittholztrocknung wird als Verdunstungstrocknung in *Trocknungskammern* insbesondere für empfindliche Laubhölzer zur Vermeidung von Trocknungsfehlern durchgeführt. Es sind aber auch leistungsfähige *Großraumtrockner (Kanaltrockner)* für Nadelholz im Einsatz, die nach diesem Prinzip arbeiten. Die Trocknungszeit beträgt je nach Holzdicke ≈ 60 bis 100 h. Dazu kommen noch mehrere Stunden für das Anwärmen und Abkühlen. Die Trocknungszeit im Freien beträgt dagegen mehrere Monate.

Bei Einsatz von Heißdampf als Trocknungsmedium reduziert sich die Trocknungszeit auf ≈ 35 % gegenüber der Verdunstungstrocknung in Kammern. Durch richtige Wahl der Trocknungsbedingungen lassen sich Fehler, wie Farbänderungen, Fleckenbildung, Verschalung (Innenrisse), Hirnrisse, Verwerfungen, vermeiden.

Furniertrocknung erfolgt bei Temperaturen von 80 bis 140°C in Durchlauftrocknern. Die Trocknungszeit beträgt 5 bis 30 min je nach Holzart und Furnierdicke.

Spänetrocknung geschieht bei Temperaturen von 100 bis 250°C meist im *Gleichstromverfahren* durch konvektiven Wärmeübergang. Dabei schweben die Späne im Trocknungsmedium. Das Trennen von Spänen und Trocknungsmedium erfolgt in Abscheidern (Zyklonen), denen meist Staubfilter o. ä. nachgeschaltet sind. Die Trocknungsdauer beträgt ≈ 1 bis 3 min.

7.2.3. Tränkung

Vollholz wird zur Verbesserung seiner Eigenschaften häufig getränkt. Neben einfachen *Tauchverfahren* (z. B. für Pentachlorphenol) sind hauptsächlich *Kesseldruckverfahren* (z. B. für das Tränken von Schwellen mit Teeröl) im Einsatz. Dabei wird das zu tränkende Holz zunächst einem Unterdruck ausgesetzt. Das danach eingebrachte Tränkmittel dringt über die natürlichen Leitungsbahnen in das Holz ein. Dieser Vorgang wird durch Überdruck unterstützt. Voraussetzung ist die Verwendung mindestens lufttrockenen Holzes. Gut tränkbar sind Ahorn, Birke und Kiefer (Splint). Fichten- und Tannenholz sowie Kernholz lassen sich kaum tränken.

7.2.4 Werkstoffbildung

Hierzu gehören alle Vorgänge, die dem Zusammenfügen von Teilen (Furniere, Stäbe, Späne, Fasern, Waben u. a.) zu Werkstoffen dienen. Dabei sind jeweils 2 Verfahrensstufen zu unterscheiden: das Bilden von Profil- oder Flächengebilden ohne festen mechanischen Zusammenhang und das Fixieren dieser Gebilde durch Zusammenpressen bei gleichzeitigem Aushärten des Bindemittels. Die Eigenschaften der herzustellenden Stoffe lassen sich in beiden Stufen beeinflussen, so daß im Rahmen der Eigenschaften des Festigkeitsträgers (z. B. Holzfaser) und des Bindemittels (z. B. Plast oder auch anorganische Bindung) das Herstellen von „Werkstoffen nach Maß" vom Dämmstoff bis zum mechanisch hoch belastbaren Konstruktionswerkstoff möglich ist.

7.2.5. Umformen

Holz läßt sich nach entsprechender Vorbehandlung innerhalb bestimmter Grenzen plastisch verformen.

Biegen. Laubhölzer, wie Buche und Esche, werden auf 80 bis 100°C erwärmt (*thermische Vorbehandlung*) und in diesem Zustand verformt. Bei der *chemischen Vorbehandlung* wird das Holz mit Ammoniak getränkt und anschließend in die gewünschte Form gebracht. Nach Entfernen des Ammoniaks behält das Holz die Form bei. Das Biegen selbst erfolgt mit Hilfe eines Biegebands aus Stahl, das einen Bruch der Fasern auf der konvexen Seite verhindert (Abb. 7.2.5-1).

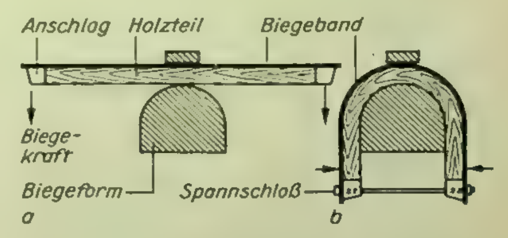


Abb. 7.2.5-1 Wirkungsweise des Biegebands a vor und b nach dem Biegen

Verdichten geschieht meist in *Preßgesenken*. Plastifiziertes und verdichtetes Holz (*Preßvollholz*) ist sehr fest und hat einen hohen Abnutzungswiderstand.

7.2.6. Fügetechnik

Nageln und Schrauben sind die ältesten Holzverbindungsverfahren. Nägel werden vor allem im Holzbau, d. h. bei der Herstellung von Bauelementen (Dachbinder, Balken, Träger u. ä.), und im Kistenbau verwendet, während Holzschrauben hauptsächlich dem Befestigen von Beschlägen dienen.

Kleben. Die zu verbindenden Elemente (Konstruktionsteile mit geometrisch fixierten Abmessungen, aber auch Partikeln) werden an den Verbindungsstellen mit Klebstoff versehen (bei Vollholz 100 bis 300 g/m^2) und unter Druck (1 bis 2 N/mm^2) zusammengefügt. Das Verfestigen des Klebstoffs geschieht durch Verdunsten des Lösungs- oder Dispersionsmittels (z. B. Polyvinylazetat-Dispersionen), durch chemische Aushärtung (z. B. Harnstoff-Formaldehydharze) oder durch Erstarren infolge Abkühlung (Schmelzkleber, Glutinleime). Die chemische Aushärtung wird oft durch Wärme (bis zu 150 °C) beschleunigt.

Dübeln. In der Möbelindustrie werden die zu verbindenden Teile durch zylindrische Holzstückchen (*Dübel*), deren Länge das 3- bis 4fache ihres Durchmessers beträgt, verbunden und verklebt (Abb. 7.2.6-1 *links*). Als Dübelmaterial werden zähe Holzarten, wie Rotbuche, Esche oder Birke, verwendet. Im Holzbau werden Dübel größerer Abmessungen in Verbindung mit Bolzen eingesetzt (vgl. 15.4.2.).

Spunden. Hierbei werden die Brettkanten wechselseitig mit einer *Nut* und einer *Feder* versehen, die ineinandergeschoben eine sehr feste Verbindung ergeben.

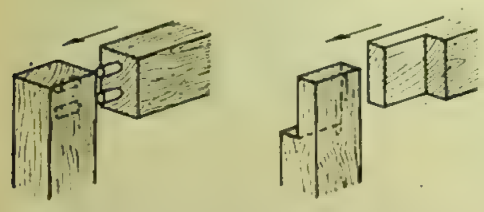


Abb. 7.2.6-1 Dübelverbindung (links) und Falzverbindung (rechts)

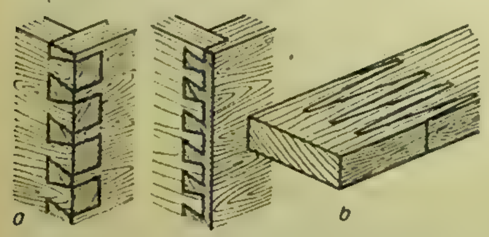


Abb. 7.2.6-2 Zinkenverbindungen: a offene (links) und einseitig verdeckte Zinkung (rechts), b Keilzinkenverbindung

Fälzen wird bei Rahmenhölzern angewendet, indem sie jeweils auf Rahmenbreite an den zu verbindenden Enden einseitig abgesetzt und paarweise bündig zusammengeklebt werden (Abb. 7.2.6-1 *rechts*).

Schlitzen. Die Hölzer werden mit *Zapfen* und *Schlitz* versehen, ineinandergepaßt und miteinander verklebt.

Zinken wird zur Eckverbindung hochkant stehender Holzteile eingesetzt. Dabei werden aus den Hirnholzenden der zu verbindenden Holzteile die *Zinken* gegeneinander versetzt herausgeschnitten oder -gefräst und die kammartigen Kanten der Teile – meist nach Auftragen von Klebstoff – zusammengeschlagen bzw. zusammengepreßt (Abb. 7.2.6-2a). Für Längsverbindungen wird die *Keilzinkung* angewandt, bei der die Hirnholzenden zweier Langhölzer fingerartig ineinandergreifen (Abb. 7.2.6-2b).

Gehren. Hierbei werden die Hirnenden zweier (flachliegender) Teile unter einem bestimmten Winkel abgeschrägt und dann durch Zusammenkleben verbunden. Bei der Gehrung unter 45° bilden die beiden Teile einen rechten Winkel.

7.2.7. Oberflächentechnik

Durch eine Oberflächenbehandlung von Holzwerkstoffen und -teilen soll eine Verbesserung der Gebrauchswerteigenschaften im weitesten Sinne erzielt werden.

Plattenwerkstoffe, vor allem Span- und Faserplatten (vgl. 7.3.4. und 7.3.5.), werden entweder furniert oder mit Plastfolie oder plastimprägnierten Papieren beschichtet (z. B. Küchenmöbel und Tischplatten).

Furnieren wird vorwiegend zur Oberflächenveredlung von Platten, seltener zur künstlerischen Gestaltung (*Intarsien*), eingesetzt.

Die Furnierkanten werden auf der *Fügemaschine* bearbeitet und danach beleimt. Mit Hilfe der *Fugenverleimmaschine* erzeugt man Furnierblätter der gewünschten Größe, die das Beschichtungsmaterial bilden. Ein „Blindfurnier" verhindert das Reißen des Deckfurniers, indem es bezüglich seiner Faserrichtung um 90° versetzt auf der Trägerplatte aufgebracht wird.

Beschichten. Das Beschichtungsmaterial, z. B. Folie, wird auf einer *Rollenpresse* auf die Trägeroberfläche aufgezogen oder in einer *Plattenpresse* aufgepreßt. Auf *Mehretagenpressen* werden die z. B. mit Melamin-Harnstoff- oder Phenolharz imprägnierten Papiere unter verhältnismäßig hohem Druck (2 N/mm^2) mit der Trägeroberfläche verbunden (laminiert). Diese im Hochdruckverfahren beschichteten Platten müssen nicht nachbehandelt (lackiert) werden, weil das Imprägnierharz des Papiers einen festen Film an der Oberfläche bildet. Beschichtet wird nach dem 1-, 2- und 3-Stufen-Verfahren (vgl. 7.3.3.).

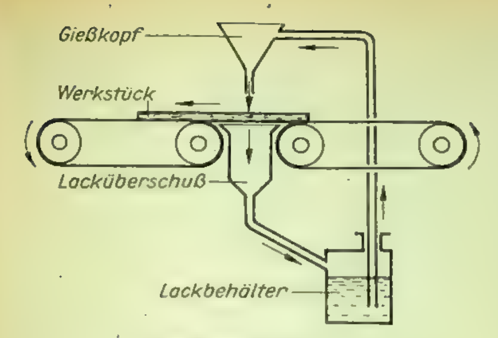


Abb. 7.2.7-1 Lackgießmaschine

Lackieren – Beizen – Färben. ***Lackbeschichtete Holzwerkstoffplatten.*** Hochglänzende Flächen werden erzeugt, indem ein Plastlackfilm (meist Alkyd- oder Polyesterharz) aufgegossen wird. Dabei gleiten die Werkstücke unter 2 Gießköpfen hindurch (Abb. 7.2.7-1). Die Transportgeschwindigkeit liegt zwischen 30 und 140 m/min je nach gewünschter Auftragdicke. Das Abdunsten und Trocknen geschieht in nachgeordneten speziellen Kanälen. Ultraviolette o. a. energiereiche Strahlen beschleunigen das Aushärten, dem sich das maschinelle *Polieren* (*Schwabbeln*) anschließt. Mattglanz erhält man durch die Wahl matttrocknender Lacke bzw. entsprechende mechanische Schlußbehandlung hochglänzender Flächen (*Mattschleifen*).

Vollholzteile erhalten durch *Beizen* z. B. mit Ammoniak oder durch *Färben* mit Anilinfarben die Tönung natürlich gedunkelten Holzes.

Mattieren. Leichter Mattglanz wird durch Auftragen einer Lösung von Zellulosenitrat (Nitrolack) erzielt.

Weitere Verfahren zum Auftragen von Anstrichstoffen sind das *Spritzen*, *Tauchen* und *Fluten* (Hindurchbewegen des Werkstücks durch einen aus Düsen austretenden Schleier des Anstrichstoffs). Sie werden insbesondere bei der Oberflächenbehandlung von Fensterrahmen angewendet. Für diesen Zweck kommt auch die besonders witterungsbeständige Plastummantelung mittels Extruder (vgl. Abb. 5.2.4-3) in Betracht.

7.3. Werkstoffe und Erzeugnisse aus Holz

7.3.1. Schnittholz

Schnittholzsortimente sind Rahmen, Kanthölzer, Bretter und Latten sowie Furniere (Abb. 7.3.1-1). Nicht zum Schnittholz werden die Schwellen gerechnet, obwohl sie nach dem gleichen technologischen Verfahren hergestellt werden. Zur Erzeugung von Schnittholz wird das angelieferte *Langholz* den bedarfsgerechten

Längen entsprechend quergeschnitten (abgelängt). Die so entstandenen Sägeblöcke werden nach Dimension und Qualität sortiert und nach dem Entrinden losweise eingeschnitten. Zum Einschneiden werden *Gattersägemaschinen* (vorwiegend für Nadelholz) oder *Blockbandsägemaschinen* (vorwiegend für dickes Laubholz) eingesetzt. Zur Weiterverarbeitung des Schnittholzes, insbesondere der Seitenbretter (Nebenprodukt), sind spezielle *Abkürz-* und *Besäumkreissägen* im Einsatz. Im Durchschnitt entstehen (Einsatzmenge = 100%) 70% Schnittholz, 13% Sägespäne und 13% stückige Holzreste. 4% betragen die Volumenverluste durch das Schwinden des Holzes. Zum Einschnitt dünnen *Rundholzes* werden Maschinen eingesetzt, die das Schnittholz (Kantholz) aus dem Sägeblock herausfräsen. Die gleichzeitig entstehenden *Frässpäne* oder *Hackschnitzel* sind für die Holzwerkstoff- und Zellstofferzeugung geeignet (vgl. 7.3.4., 7.3.5., 7.4.). Die Schnittholzausbeute beträgt in diesem Fall weniger als 50% der Einsatzmenge, und es fallen ≈ 40% verwertungsfähige Holzreste an.

7.3.2. Furniere und Lagenhölzer

Furnier ist ein Schnittholz mit einer Dicke <3 mm (vgl. Abb. 7.3.1-1). Es wird aus thermisch plastifiziertem Holz durch Abschneiden (*Messerfurnier*) oder Abschälen (Abb. 7.3.2-1) hergestellt. Das Herstellen durch Sägen ist wegen der großen Holzverluste kaum noch gebräuchlich. Während die Messerfurniere vorwiegend der dekorativen Gestaltung von Oberflächen dienen, werden aus den endlos hergestellten *Schälfurnieren* Lagenhölzer erzeugt.

Lagenholz ist ein Werkstoff, der aus Furnieren mittels eines härtbaren Plastklebstoffs geklebt und symmetrisch geschichtet aufgebaut ist. Da-

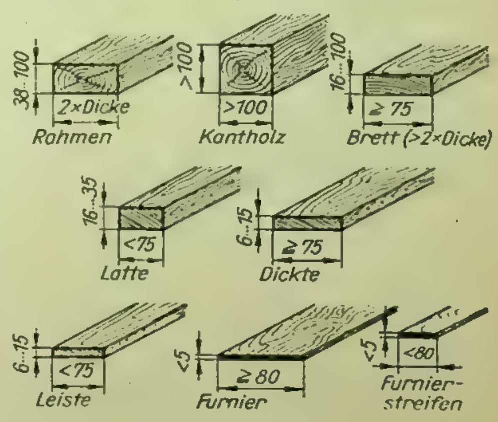


Abb. 7.3.1-1 Schnittholzsortimente

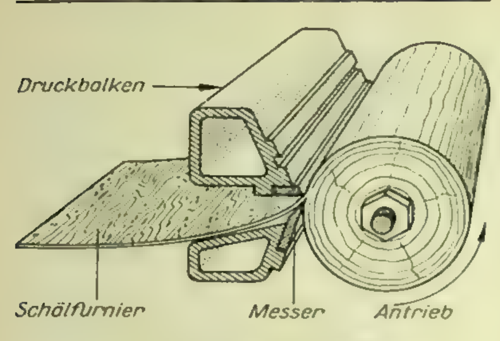


Abb. 7.3.2-1 *Herstellung von Schälfurnier*

durch lassen sich die Hygroskopizität wie auch das richtungsabhängige Festigkeitsverhalten von Vollholz gezielt verbessern. Man unterscheidet *Schichtholz*, das durch faserparallele Verklebung beleimter oder getränkter Furniere hergestellt wird, sowie *Sperr-* und *Sternholz*, bei denen die Faserrichtungen sich kreuzen. Nach dem Grad der Verdichtung und dem Gehalt an Plastklebstoff wird in *Normallagen-*, *Plastlagen-*, *Preßlagen-* und *Plast-Preßlagenholz* unterteilt. Die Lagenhölzer werden industriell auf hydraulischen *Etagenpressen* verklebt, die für Preßlagenholz Drücke bis ≈ 30 N/mm² aufbringen. Als Klebstoffe werden Harnstoff- oder Phenolharzkleber eingesetzt, die zwischen 100 und 180 °C aushärten. Die Eigenschaften von Lagenhölzern sind herstellungsbedingt unterschiedlich (Tab. 7.3.2-2).

Tab. 7.3.2-2 *Eigenschaften von Lagenholz*

Lagenholzart	Dichte in g/cm³	Wasseraufnahme in %	Druckfestigkeit in N/mm²	Zugfestigkeit in N/mm²	Biegefestigkeit in N/mm²	Härte (HB) in N/mm²
Schichtholz	0,80	32	92	151	181,5	–
Sperrholz fünflagig, 6 mm dick	0,70	20	57	67	101	–
Preßschichtholz	1,35	8	216	295	354	250
Preßsperrholz	1,40	8	316	137	210	300
Preßsternholz	1,40	4	286	118	204	300 · · · 400

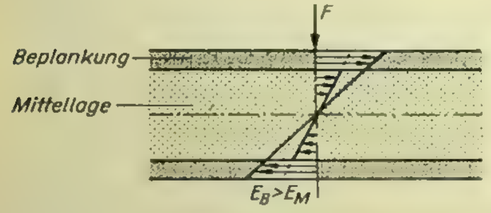


Abb. 7.3.3-1 *Spannungsverteilung in einem Verbundwerkstoff bei Biegebelastung F (E_M = Elastizitätsmodul der Mittellage, E_B = Elastizitätsmodul der Beplankung)*

Schichtholz dient vor allem zur Herstellung hochbeanspruchter Teile, wie Luftschrauben, Sportgeräte u. ä., bei denen hohe Festigkeiten in nur einer Richtung gefordert werden. Sperrholz wird in Plattenform (3 000 mm × 1 500 mm) vorwiegend in der Möbelindustrie, im Innenausbau sowie in der Verpackungsindustrie verwendet. Sternholz ist nur in verdichtetem Zustand von Bedeutung; aus ihm werden, ebenso wie aus verdichtetem Sperrholz, Zieh-, Druck- und Preßwerkzeuge (insbesondere zum Umformen von Aluminiumblech), Zahnräder, Riemenscheiben u. a. gefertigt.

Tab. 7.3.3-2 *Materialien für Verbundwerkstoffe*

Beplankungsmaterialien	Mittellagen
Furniere (Absperr- und Deckfurniere)	Vollholz
Werkstoffe aus Holz (Spanplatten, Faserplatten, Furnierplatten u. ä.)	Werkstoffe aus Holz (Sperrholz-, Span- und Faserplatten)
Asbestplatten	Hohlraumsysteme aus Vollholz, Holzwerkstoffen, Papierwaben u. ä.
Bleche	Hartschäume (Plaste)
Plaste (verstärkt und unverstärkt)	Pappen
Laminate	anorganische Werkstoffe, z. B. Gips, Glas, Zement
Schichtpreßstoffe	Kork

7.3.3. Holz-Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe entstehen durch Kombination verschiedener Materialien (z. B. Sandwichkonstruktionen). Meist werden dünne ein- oder mehrlagige, verstärkte oder unverstärkte Deckschichten kraftschlüssig mit relativ dicken, leichten Mittellagen verbunden. Dabei werden ähnliche Effekte erzielt wie im Maschinenbau und Bauwesen durch die Verwendung von I-Profilen (Abb. 7.3.3-1). Durch die Möglichkeit, Eigenschaften zu erzielen, die den einzelnen Bestandteilen nicht eigen sind, erobern sich Verbundwerkstoffe aus unterschiedlichsten Materialien ständig größere Einsatzgebiete. Vor allem der Leichtbau nutzt diese Möglichkeiten. Zur Verbindung der Materialien werden die in der

Holzindustrie üblichen Bindemittel (chemisch härtende Kunstharze) verwendet. Die Auswahl ist von den eingesetzten Materialien (Tab. 7.3.3-2) und den zu erzielenden Eigenschaften abhängig.

Nach dem Arbeitsablauf bei der Herstellung unterscheidet man 3 Verfahren:

1. 3-Stufen-Verfahren
– Vorfertigung der Mittellage (1. Stufe)
– Vorfertigung des Beplankungsmaterials (2. Stufe)
– Verbindung von Beplankungsmaterial und Mittellage (3. Stufe)

Beispiele: Tischlerplatten, Türblätter mit Wabenkernmittellage.

2. 2-Stufen-Verfahren
– Vorfertigung der Mittellage (1. Stufe)
– Fertigung des Beplankungsmaterials bei gleichzeitiger Verbindung mit der Mittellage (oder umgekehrt) (2. Stufe)

Beispiele: Oberflächenpreßvergütete (OPV) Spanplatten, Faserplatten und Polyurethan-Schaumstoff-Verbundplatten.

3. 1-Stufen-Verfahren
– Fertigung von Beplankungsmaterial und Mittellage in einem Arbeitsgang

Beispiele: In einem Preßvorgang oberflächenpreßvergütete hergestellte Spanwerkstoffe (Spanplatten oder Spanformkörper), mehrschichtige Span- und Faserplatten.

7.3.4. Holzspanwerkstoffe

Holzspanwerkstoffe sind ebene oder sphärisch geformte Werkstoffe (Halbzeuge), die aus spanartigen Partikeln aus Holz oder verholzten Einjahrespflanzen (z. B. Flachs) sowie einem organischen oder anorganischen Bindemittel unter Einwirkung von Druck und/oder Wärme hergestellt werden.

Durch Zugabe von vergütenden Stoffen (hydrophobierende, fungizide und insektizide Mittel) sowie durch entsprechende Verfahrensführung (Druck, Wärme, Feuchte) können die Eigenschaften unterschiedlichen Verwendungszwekken angepaßt werden.

Zu den Holzspanwerkstoffen gehören Spanplatten (Möbel- und Bauspanplatten), Spanformkörper, Holzwolle-Leichtbauplatten, zementgebundene Holzspanplatten, Flachsschäbenplatten, Bagasseplatten u. a. Bedeutendste Vertreter der Holzspanwerkstoffe sind die *Spanplatten*. Sie werden eingeteilt nach:

– der Rohdichte (Verdichtung) in Spanplatten geringer, mittlerer (450 bis 850 kg/m^3) und hoher Rohdichte;
– der Lage der Späne (verfahrensbedingt) in flachgepreßte und stranggepreßte Spanplatten;
– der Spanart in Spanplatten aus Schneid-, Schlag-, Reiß- oder Mahl- und Abfallspänen (Für die Oberflächenvergütung ist oft eine genauere Bezeichnung der Spanart der Deckschicht, z. B. Feinstspan – Faserspan – Normalspan – Deckschicht, notwendig.);
– der Querschnittsstruktur in einschichtige, drei- und mehrschichtige sowie Spanplatten mit stufenlosem Übergang in der Struktur;
– der Klebstoffart, z. B. in aminoplast- und phenoplastgebundene Spanplatten;
– der Oberflächenbeschaffenheit in unbeschichtete (preßblanke, egalisierte), vorbeschichtete (furnierte, gespachtelte, grundierfolienbeschichtete u. ä.) und endbeschichtete (thermoplastbeschichtete, oberflächenpreßvergütete, lackierte u. ä.) Spanplatten.

Die Gründe für die rasche Entwicklung der Spanplattenproduktion liegen in den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, den hohen Gebrauchswerteigenschaften, der Verwendung technisch bisher nicht genutzter Holzsortimente und -reste sowie der weitgehenden mechanisierten und z. T. automatisierten Produktion.

In der Möbelindustrie ist die Spanplatte der wichtigste Werkstoff, dessen Produktion in der DDR zu 90% in der Möbelindustrie eingesetzt wird.

Spanplattenherstellung. Die verarbeitungsfähigen Holzsortimente und -reste werden z. B. in *Messerwellenzerspanern* (Abb. 7.3.4-1) oder *Messerringzerspanern* (für kleinstückige Holzreste) in 5 bis 25 mm lange und 0,2 bis 0,5 mm dicke Späne zerkleinert, für spezielle Spanarten (z. B. Feinstspäne) nachzerkleinert und in *Naßspanbunkern* gesammelt. Aus den Bunkern gelangen die Späne in *Trockner* mit mechanischer oder pneumatischer Spanbewegung, wo sie auf einen Feuchtesatz von 3 bis 5% getrocknet werden. Das getrocknete Spangut wird zur Qualitätsverbesserung sortiert und Beleimungsmaschinen zugeführt. Darin wird dem Spangut das mit Vergütungsstoffen gemischte und mit Wasser verdünnte Bindemittel in einer Menge von 6 bis 12% Festharz (bezogen auf die darrtrockene Spanmasse) zugemischt.

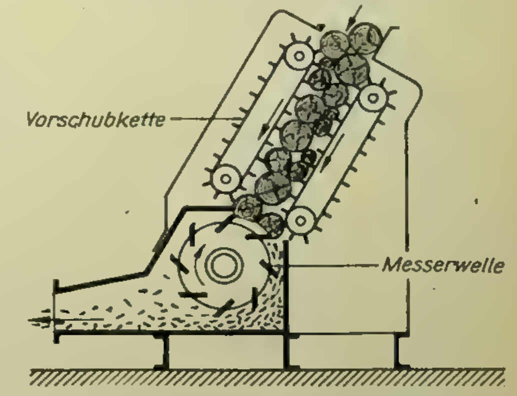


Abb. 7.3.4-1 Messerwellenzerspaner

Flachpreßverfahren. Das beleimte Spangut wird entsprechend der gewünschten Querschnittsstruktur in einer oder mehreren Lage(n) zu Vliesen gestreut, in einigen Anlagen vorverdichtet und einer periodisch arbeitenden, beheizten *Ein-* oder *Mehretagenpresse* oder einer kontinuierlich arbeitenden beheizten *Stahlbandpresse* zugeführt. Mit einem spezifischen Preßdruck von 1,5 bis 3,0 N/mm² bei Temperaturen zwischen 150 bis 220 °C und Preßzeiten um 0,2 bis 0,3 min/mm Plattendicke werden die Vliese zu Platten gepreßt. Die Fertigplattenformate liegen je nach Anlage in der Breite zwischen 1 250 und 2 600 mm, in der Länge zwischen 2 500 und 22 000 mm. Kennziffern für die Produktion enthält Tab. 7.3.4-2.

Strangpreßverfahren. Das beleimte Spangut wird einer meist vertikal arbeitenden *Strangpresse* zugeführt und zwischen 2 beheizten Stahlplatten hindurchgepreßt. Dabei entsteht ein endloser Strang von meist 1 250 oder 1 800 mm Breite, der auf die gewünschte Länge geschnitten wird. Es können Voll- und Röhrenplatten in Dicken zwischen 10 und 120 mm hergestellt werden, die zur Erhöhung der Festigkeit beplankt werden müssen (vgl. 7.3.3.).

Spanformteile. Beleimtes Spangut (6 bis 30 % Festharz) wird in beheizten Preßformen zu meist oberflächenbeschichteten einfach oder sphärisch geformten Fertigerzeugnissen verpreßt (Einsparung von Be- und Verarbeitungsstufen). Durch die fehlende Fließfähigkeit des Spangutes sind der Formgebung Grenzen gesetzt.

Holzwolle-Leichtbauplatten (HWL) gehören zu den anorganisch gebundenen Werkstoffen aus Holz und sind den Baustoffen zuzurechnen. Als Bindemittel dienen Gips, Magnesiabinder oder Zemente. Auf *Holzwolle-Hobelmaschinen* wird Holzwolle mit einem Querschnitt von ≈ 4 mm × 0,4 mm erzeugt. Die Holzwolle wird entsprechend dem Bindemittel mit Wasser, Magnesiumsulfatlösung oder Abbindebeschleunigern vorbehandelt und mit dem Bindemittel gemischt, zu einem Strang und/oder Platten geformt und unter mäßigem Druck, z. T. unter Einwirkung von Wärme, fixiert. Dem Bindemittel entsprechend schließt sich eine längere Lagerung bis zum Erreichen der Endfestigkeit an.

Zementgebundene Holzspanplatten verbinden die guten Eigenschaften der organisch gebundenen Spanplatte (Festigkeit, Verarbeitbarkeit) mit den Vorteilen des anorganischen Bindemittels (Witterungs-, Feuerbeständigkeit sowie Widerstandsfähigkeit gegenüber biologischen Schädlingen und geringe Quellung). Sie enthalten ≈ 25 Masse-% Holzspangut.

7.3.5. Holzfaserwerkstoffe

Holzfaserwerkstoffe sind flächig oder sphärisch geformte Werkstoffe (Halbzeuge), die aus regellos miteinander verfilzten und durch arteigene und/oder umgesetzte organische Bindemittel miteinander verbundenen Fasern oder Faserbündeln lignozellulosehaltiger Materialien bestehen. Durch Zugabe von vergütenden Stoffen sowie durch entsprechende Verfahrensführung (Druck und Wärme bzw. nur Wärme sowie Feuchte) können die Eigenschaften analog den Spanplatten (vgl. 7.3.4.) unterschiedlichen Verwendungszwecken angepaßt werden. Sie stellen eine sinnvolle Ergänzung der Spanwerkstoffe dar und sind durch die Verwendung von Fasern gegenüber Spanplatten homogener.

Faserplatten auf der Basis Holz oder verholzter Einjahrespflanzen bilden den überwiegenden Teil der Holzfaserwerkstoffe. Holzfaserformkörper befinden sich in der Entwicklung bzw. werden in geringem Umfang produziert.

Faserplatten werden eingeteilt nach der Rohdichte (Verdichtung) in:

– Faserplatten niedriger Dichte (bis 400 kg/m³) als poröse, nicht gepreßte Isolier- und Dämmplatten;

– Faserplatten mittlerer Dichte (400 kg/m³ bis 850 kg/m³); wichtigste Anwendung als *mitteldichte Faserplatten* (MdF-Platten) nach dem Trockenverfahren für den Möbelbau (Bindemittelanteil, Preßtechnik und Eigenschaften ähnlich den Möbelspanplatten, vgl. 7.3.4.);

– Faserplatten hoher Dichte (über 850 kg/m³) als harte bzw. extraharte Faserplatten nach dem Naß- oder Trockenverfahren.

Das Naßverfahren zur Erzeugung von Faser-

Tab. 7.3.4-2 *Kennziffern der Produktion von Holzspan- und Faserplatten*

Kennziffer	Verbrauch je m³ (≈ 0,7 t) *Spanplatten Flachpreßverfahren*	Verbrauch je t *harte Faserplatten* *Naßverfahren*	*Trockenverfahren*
Holz (Kiefer, Weichlaubholz) in fm	1,55–1,7	2,3–2,9	2,1–2,2
Bindemittel (Feststoff) in kg	55–65	0–25	15–25
Paraffin (Feststoff) in kg	2,5–3,2	1,5–15	11–20
Elektroenergie in kWh	150–200	460–600	560–610
Wärmeenergie in GJ	2,1–4,2	6,3–9,6	5,0–8,4
Wasser in m³		15–80	3–10

platten ist eng mit der Entwicklung der Papier- und Pappeindustrie verbunden (vgl. 7.4.). Die Entwicklung des Trockenverfahrens setzte nach dem 2. Weltkrieg verstärkt ein und ist noch nicht abgeschlossen. Beide Verfahren haben eine etwa gleiche Faserstoffherstellung, unterscheiden sich aber wesentlich bei der weiteren Verarbeitung (s. u.). Mit dem *Naßverfahren* (Feuchtesatz vor dem Pressen = 100%) werden überwiegend einseitig glatte, harte Platten erzeugt (Siebmarkierung), mit dem *Trockenverfahren* (Feuchtesatz vor dem Pressen 5 bis 12%) beidseitig glatte, harte und mitteldichte Platten. Das *Halbtrockenverfahren* (Feuchtesatz vor dem Pressen 15 bis 20%) hat sich nicht durchsetzen können.

Faserplattenherstellung. Unzerkleinert angeliefertes Rohmaterial (Schichtholz, Schwarten, Säumlinge) wird zur besseren Substanzerweichung vor der Zerfaserung in *Scheiben-* oder *Trommelhackmaschinen* zu Hackschnitzeln (Abmessungen ≈ 25 mm × 25 mm × 5 mm) verarbeitet, sortiert (Aussortierung von Grobgut und Staub) und gewaschen. Vorzerkleinert angeliefertes Rohmaterial (Hackschnitzel aus Durchforstungshölzern oder Schlagabraum, aus Sägewerken usw.) wird nur sortiert und gewaschen. Dieser Vorbehandlung schließt sich eine Bunkerung in Vertikalsilos an. Zur anschließenden Zerfaserung wendet man in Europa das *Asplund-Defibrator-Verfahren* an. Das Zerfaserungsaggregat ist ein gekapselter Stahlscheibenraffineur (700 bis 900 U/min) mit vorgeschalteter Zuführ- und Dämpfeinrichtung (Vorwärmer) sowie einer periodisch oder kontinuierlich arbeitenden Ausschleusvorrichtung für den Faserstoff. In Abhängigkeit vom eingesetzten Rohmaterial werden die Hackschnitzel im Vorwärmer mit Dampfdrücken zwischen 0,8 und 1,2 N/mm^2 und Dämpfzeiten zwischen 1 und 5 min gedämpft. Je Tonne darrtrockenen Faserstoffs werden 125 bis 200 kWh und 0,5 t Dampf benötigt. Die Leistung des Defibrators kann bis zu 125 t/24 h betragen.

Naßverfahren. Der Faserstoff wird mit Wasser verdünnt, in der Regel nachzerfasert (Vergleichmäßigung) und in großen Behältern (Bütten) zwischengelagert. In diesen Bütten kann Bindemittel zugegeben werden (z. B. bis zu 3% Phenolharz, welches mit Schwefelsäure zu Flokken ausgefällt wird, die sich an die Fasern anlegen). Die Vliesbildung erfolgt auf einer *Langsiebmaschine* (vgl. 7.6.1.), wo der Faserstoff entwässert wird. Zur Herstellung von porösen Platten werden die Faservliese *Durchlauf-Trocknern*, zur Herstellung von harten oder mitteldichten Platten beheizten *Etagenpressen* (bis zu 30 Etagen) zugeführt. Unter Druck und Temperaturzufuhr härten die Platten aus und es kommt zur Holzselbstverklebung. Zusätzliche Bindemittel sind nicht immer notwendig. Eine nachträgliche Vergütung (Wärmebehandlung oder Imprägnierung mit trocknenden Ölen) wird z. T. nach dem Pressen durchgeführt. In der Konditionierung werden die Platten auf die Auslieferungsfeuchte von 5 bis 9% gebracht.

Ein besonderes Problem des Naßverfahrens ist der hohe Wasserbedarf. Durch technische Weiterentwicklung gelingt es immer besser, den Wasserkreislauf im Betrieb zu schließen und den Wasserbedarf von bisher ≈ 60 auf 2 bis 3 m^3 Wasser/t Faserplatten zu senken.

Trockenverfahren. Nach dem Defibrator wird der Faserstoff in *Stromtrocknern* getrocknet und anschließend sortiert. Wird nicht schon beim Ausschleusen des Faserstoffs aus dem Defibrator Bindemittel zugegeben (Phenolharz), erfolgt eine Beleimung des Faserstoffs analog der Beleimung von Spänen (Harnstoffharz). Eine Bindemittelzugabe (8 bis 11%) ist in jedem Fall notwendig, da es durch geringe Faserstoffeuchte nicht zur Ausbildung holzeigener Bindungskräfte wie beim Naßverfahren kommt. Der Faserstoff wird in Vliesbildungseinrichtungen (*Feltern*) zu ein- oder mehrlagigen Vliesen geformt, in kontinuierlichen Bandvorpressen vorgepreßt und hydraulischen Mehretagenpressen zugeführt. Für dünne Platten (1,5 bis 5 mm) werden *Walzenpressen* verwendet.

7.3.6. Erzeugnisse aus Holzwerkstoffen

Die bedeutendsten Erzeugnisse aus Holzwerkstoffen sind Möbel, Bauelemente (Fenster, Türen, Träger, Wandelemente u. a.) und Holzwaren (Verpackungsmittel, Stiele, Holzwolle und Kleinteile, wie z. B. Küchengeräte). Der Einsatz von Vollholz als Konstruktionswerkstoff geht zugunsten von Holz-Kombinationswerkstoffen, wie z. B. Span- und Faserplatten, zurück. Der Grund dafür liegt in dem geringen Vorfertigungsgrad und der Inhomogenität des eingesetzten Schnittholzes, das deshalb nur geringe Materialausnutzung (meist < 50%) zuläßt. Die Ausnutzung von Kombinationswerkstoffen liegt dagegen > 90% bei einem hohen Mechanisierungs- bzw. Automatisierungsgrad.

Die Fertigung von Erzeugnissen aus Holzwerkstoffen geschieht im wesentlichen in folgender Reihenfolge, wobei sich die Arbeitsgänge teilweise überschneiden können:

- Zuschnitt der benötigten Montageteile aus dem eingesetzten Werkstoff (Schnittholz, Platten, Furnier u. a.) meist mit Hilfe von Sägemaschinen,
- mechanische Bearbeitung der Zuschnitte zur Herstellung der endgültigen Form und des Anbringens von Beschlägen mit Hilfe von Fräsmaschinen,
- Oberflächenbehandlung (z. B. Lackgießen und Schwabbeln oder Beschichten vor der mechanischen Bearbeitung),
- Montage zum Fertigerzeugnis.

7.4. Technologie der Papierfaserstofferzeugung

Rohstoff für die Erzeugung von Papier, Karton und Pappe ist vorwiegend das Holz, in untergeordnetem Maße auch Einjahrespflanzen, z. B. Stroh. Durch chemischen Aufschluß des Holzes erhält man Zellstoff, durch mechanische Zerfaserung Holzstoff. Als Sekundärfaserstoff wird in zunehmendem Maße Altpapier verwendet. Der Einsatz von synthetischen Fasern ist unbedeutend. Abb. 7.4.0-1 zeigt in einer Übersicht die Faserstoffe für die Papiererzeugung sowie die prozentualen Einsatzmengen in der Welt und der DDR.

7.4.1. Technologie der Holzstofferzeugung

Holzstoff ist ein durch mechanische Zerfaserung von Holz gewonnener Faserstoff, wobei vor allem 2 Verfahren zur Anwendung kommen: das Stein- und das Refiner-Verfahren.

Stein-Verfahren. Der Schleifvorgang ist ein thermo-mechanischer Prozeß. Das in Spezialmaschinen entrindete Rundholz von 1 m Länge wird mit einem bestimmten Druck unter Wasserzusatz gegen einen Schleifstein gepreßt, der mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 18 bis 50 m/s rotiert. Als Schleifstein werden Beton- oder Keramiksteine verwendet, deren Oberflächen pro-

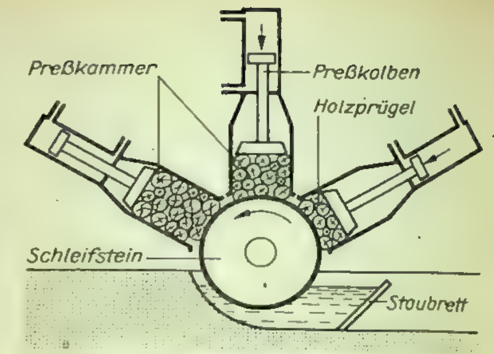


Abb. 7.4.1-1 Pressenschleifer

filiert sind. Durch die Drehung des Steins gleiten die Steinspitzen in rascher Folge an den im Holz befindlichen Fasern vorbei. Durch diese Druckwechselbeanspruchungen mit Frequenzen von 4000 bis 12000 Hz wird das Holzgefüge erwärmt, die Mittellamelle plastiziert und die Faser aus dem Faserverband herausgelöst.

Schleiferarten. Beim *Pressenschleifer* (Abb. 7.4.1-1) wird das Holz von Hand in eine Preßkammer eingelegt und durch einen Preßkolben an den Stein gedrückt. Pressenschleifer werden als Drei- und Vierpressenschleifer gebaut. Die Leistung ist gering und der manuelle Aufwand hoch. Die Anwendung erfolgt nur noch in kleineren Betrieben.

Der *Magazinschleifer* (Abb. 7.4.1-2) besitzt 2 Pressen. Das Holz ist in einem großen Magazin angeordnet, das maschinell beschickt wird. Beim

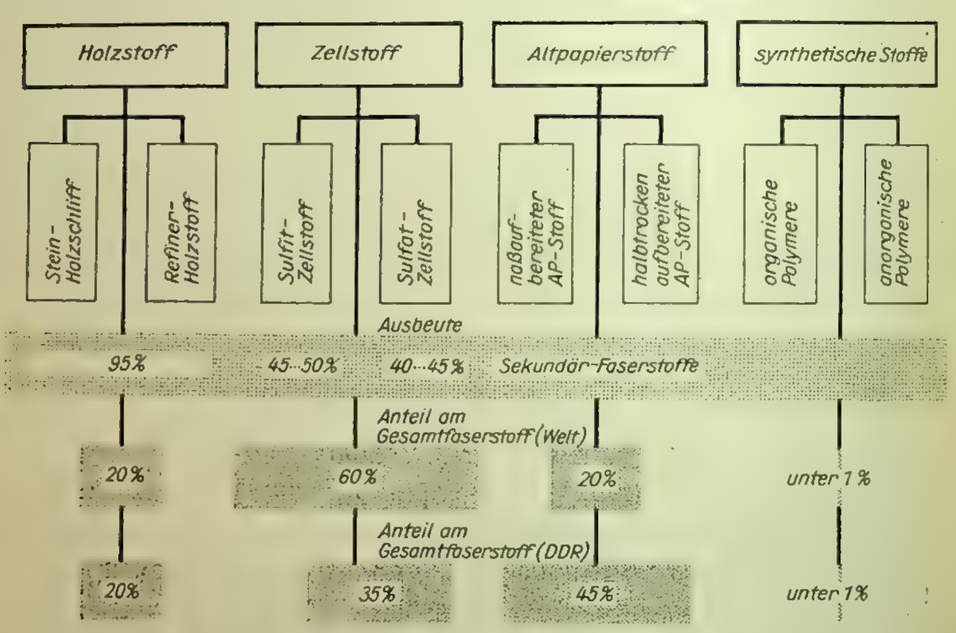


Abb. 7.4.0-1 Faserstoffe der Papiererzeugung (Übersicht)

Zurückfahren des Preßkolbens rutscht das Holz selbständig in die Preßkammer ein.
Der *Stetigschleifer* (Abb. 7.4.1-3, Tafel 26) ist am weitesten verbreitet. Er besitzt über dem Schleifstein einen Schacht, dessen Inhalt stetig durch die Förderketten gegen den Schleifstein gepreßt wird. Der Kettenvorschub erfolgt durch ein besonderes Antriebsorgan. Die Beschickung des Schachts geschieht maschinell. Stetigschleifer werden heute mit Antriebsleistungen bis zu 4000 kW, Stein-Umfangsgeschwindigkeiten von 50 m/s und Leistungen von 70 t Holzstoff pro Tag gebaut.
Refiner-Verfahren. Bei diesem Verfahren werden Hackschnitzel mit Abmessungen von ≈ 30 mm × 40 mm × 5 mm in Scheibenmühlen

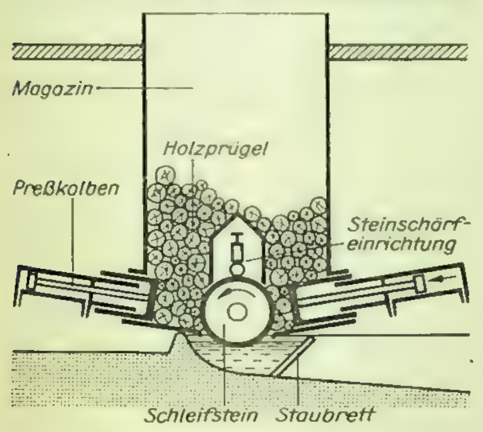


Abb. 7.4.1-2 *Magazinschleifer*

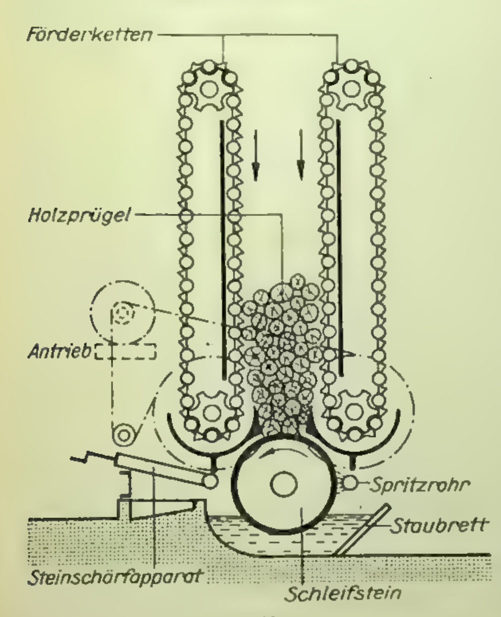


Abb. 7.4.1-3 *Stetigschleifer*

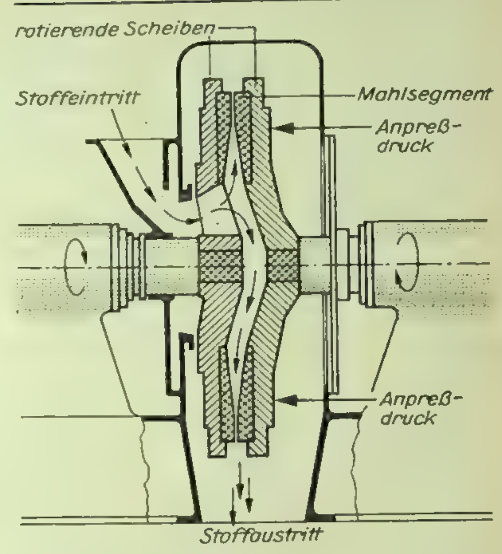


Abb. 7.4.1-4 *Scheibenmühle*

(Abb. 7.4.1-4) zerfasert. Die Stahlscheiben rotieren mit Umfangsgeschwindigkeiten von 17 bis 25 m/s.
Aufbereitung des Holzstoffs. *Sortierung*. Der beim Zerfasern gewonnene Stoff enthält noch zahlreiche Späne, Splitter, Faserbündel, Sand und Unreinheiten, die für die Papiererzeugung ungeeignet sind und deswegen entfernt werden müssen. Die groben Bestandteile werden durch eine *Grobsortierung* auf *Plansortierern* abgeschieden (Abb. 7.4.1-5). Die *Feinsortierung* erfolgt in mehreren Stufen in *Sortierern mit zylindrischen Sieben* (Abb. 7.4.1-6), die Lochungen von 0,6 bis 2,5 mm Durchmesser aufweisen. Der abgetrennte Grobstoff wird nochmals in Scheibenmühlen zerkleinert und erneut der Sortierung zugeführt.
Während der Sortierung hat der Holzstoff eine *Stoffdichte* von ≈ 0,5 %, d. h., 0,5 Teile Holzstoff kommen auf 99,5 Teile Wasser. Für die weitere wirtschaftliche Verarbeitung muß der Holzstoff entwässert werden. Zur Entwässerung werden Eindicker bzw. *Entwässerungsmaschi-*

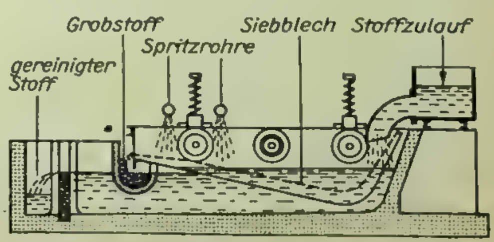


Abb. 7.4.1-5 *Plansortierer*

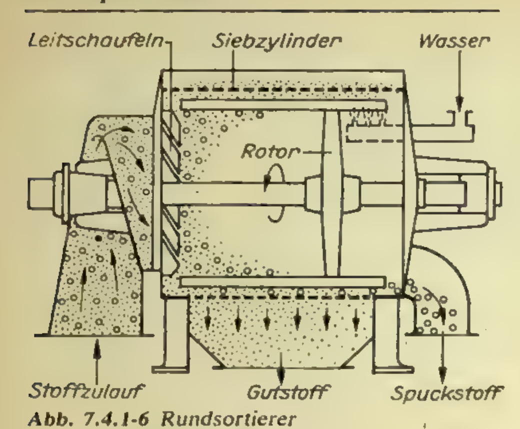


Abb. 7.4.1-6 Rundsortierer

nen eingesetzt. Wird der Holzstoff im gleichen Betrieb weiterverarbeitet, so erfolgt eine Entwässerung auf ≈ 6 % Stoffdichte. Soll der Holzstoff als Handelsstoff an andere Papierfabriken verkauft werden, so wird er auf Entwässerungsmaschinen, wie *Doppelsiebpressen*, auf 30 bis 40 %, z. T. auch auf 80 bis 90 % Trockengehalt gebracht.

Holzstoffarten. *Stein-Holzschliff* ist ein durch mechanische Zerfaserung von Rundholz auf einem Schleifstein gewonnener Faserstoff.

Refiner-Holzstoff ist durch mechanische Zerfaserung von Hackschnitzeln in einem Scheibenrefiner hergestellter Faserstoff.

Gemahlener Stein-Grobschliff ist ein durch mechanische Zerfaserung von Rundholz auf einem Schleifstein entstandener Faserstoff, der anschließend in einem Scheibenrefiner nachbehandelt wird.

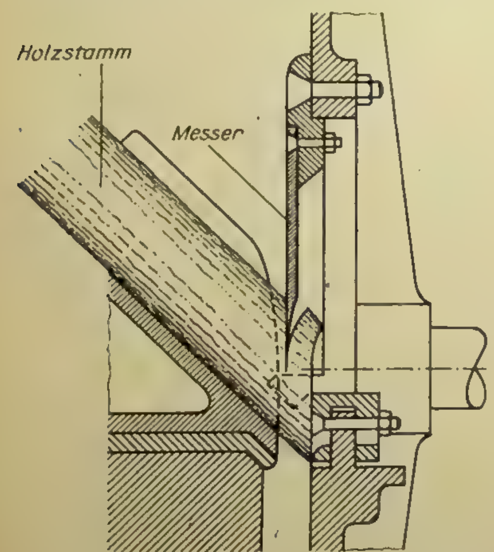


Abb. 7.4.2-1 Wirkprinzip einer Hackmaschine

Eigenschaften und Verwendung von Holzstoff. Die Strukturbestandteile des Holzstoffs werden als Faserstoff, Feinstoff und Splitter bezeichnet. Der *Faserstoff* gliedert sich in lange Fasern, den Faserlangstoff, und kurze Fasern, den Faserkurzstoff, der *Feinstoff* in Schleim- und Mehlstoff. Je nach dem Mengenanteil und der Qualität der einzelnen Fraktionen ergibt sich eine bestimmte Holzstoffgüte. Der Weißgrad beträgt 60 bis 65 %. Durch eine Bleiche mit Natriumbisulfit, Hydrosulfit oder Peroxid kann er noch erhöht werden.

Holzstoff wird aufgrund seiner geringen Festigkeitseigenschaften und Vergilbungsneigung vorwiegend für kurzlebige Massenpapiere, wie Zeitungsdruckpapier, und für die Herstellung von Karton und Pappen eingesetzt.

7.4.2. Technologie der Zellstofferzeugung

Zellstoff wird durch chemischen Aufschluß von Holz oder Einjahrespflanzen, wie Stroh und Schilf, gewonnen. Das in der Mittellamelle befindliche Lignin wird dabei durch Kochen unter Druck herausgelöst und die Faser in ihrer vollen Länge freigelegt. Die Ausbeute beträgt nur 40 bis 50 %, da die nicht aus Zellulose bestehenden Bestandteile, wie Lignin, Hemizellulosen, akzessorische Bestandteile, gelöst werden und in die zur Kochung verwendete Säure oder Lauge übergehen.

Sulfitzellstofferzeugung. *Sulfitzellstoff* entsteht durch Kochen pflanzlicher Rohstoffe, vorwiegend Holz, mit einer sauren Bisulfitlösung. Nach dem *Sulfitverfahren* lassen sich sowohl Nadel- als auch Laubhölzer aufschließen. Kiefer läßt sich wegen ihres hohen Harzgehalts nur schwer verarbeiten.

Holzvorbereitung. Das Holz wird vor der Kochung entrindet und in *Hackmaschinen* (Abb. 7.4.2-1) zu Hackschnitzeln von etwa 30 mm × 40 mm × 5 mm zerkleinert. Die Hackmaschine besteht aus einer rotierenden schweren Stahlscheibe, die mit Messern bestückt ist. Die Hackschnitzel werden in Sortierern auf eine gleichmäßige Qualität gebracht und gelangen in Silos, die über den Kochern angeordnet sind.

Säureherstellung. Die Hackschnitzel werden meist mit einer wäßrigen Lösung von Kalziumbisulfit und schwefliger Säure gekocht, die als Kochsäure bezeichnet wird. Als Basen werden auch Magnesium, Natrium und Ammonium verwendet.

Zur Herstellung der Kochsäure werden Schwefel oder schwefelhaltige Substanzen verbrannt und die entstehenden SO_2-Gase in geeigneten Apparaturen, vorwiegend wasserberieselte und mit Kalkstein gefüllte Türme, in Wasser absorbiert.

Kochprozeß. Die Kochung der Hackschnitzel kann diskontinuierlich oder kontinuierlich erfolgen. Bei der *diskontinuierlichen Kochung* werden die Hackschnitzel aus dem Silo in Stahlkocher mit 100 bis 300 m^3 Inhalt eingebracht. Wegen der Korrosion durch die Kochsäure sind die Kocher mit säurefestem Stahl plattiert. Der gefüllte Kocher wird verschlossen und mit Dampf beheizt. Die Kochung wird nach bestimmten Temperatur- und Druckdiagrammen durchgeführt. Das Fertigkochen erfolgt bei Temperaturen von 130 bis 145 °C und einem Druck von 4 bis 6 · 10^5 Pa. Nach Abschluß der Kochung wird der Kocher entleert und die Ablauge von dem Kocherstoff getrennt (Abb. 7.4.2-2). Beim *kontinuierlichen Kochvorgang* wird der Kocher, der aus einem 20 m langen, zylindrischen Rohr besteht, laufend mit Hackschnitzeln beschickt. Kochsäure und Hackschnitzel durchwandern den Kocher von oben nach unten, wobei verschieden heiße Zonen durchlaufen werden.

Stoffaufbereitung. Der Stoff wird gewaschen und *Separatoren* zugeleitet, die die teilweise noch in Hackschnitzelform zusammenhängenden Faserbündel in Einzelfasern zerlegen. Anschließend wird der Stoff nach einer Verdünnung sortiert. In der 1. Stufe werden auf Plansortierern (vgl. Abb. 7.4.1-5) unvollkommen aufgeschlossene Bestandteile, insbesondere Äste, abgeschieden. Das Entsanden des Stoffs erfolgt in Hydrozyklonen (Abb. 7.4.2-3). Zur Feinsortierung werden Sortierer mit zylindrischen Sieben (vgl. Abb. 7.4.1-6) verwendet. Der Zellstoff wird bei Weiterverarbeitung im eigenen Betrieb in *Eindickern* auf 5 bis 6 % Stoffdichte entwässert. Für den Versand wird auf *Entwässerungsmaschinen* ein Trockengehalt von 40 bis 45 %, z. T. auch von 80 bis 90 % eingestellt.

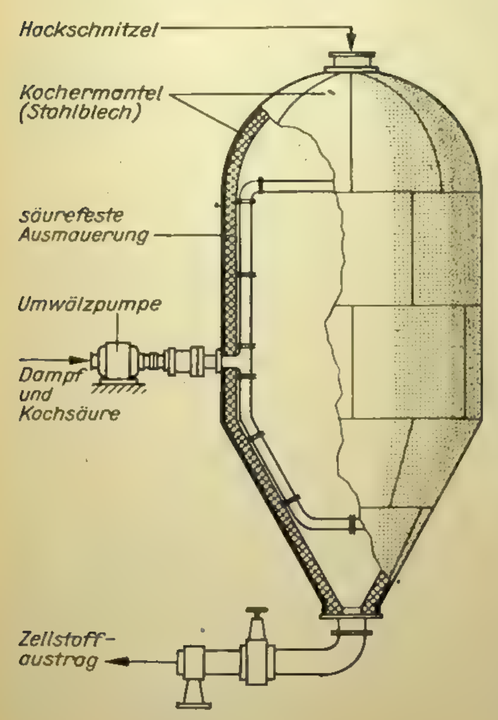


Abb. 7.4.2-2 Kocher

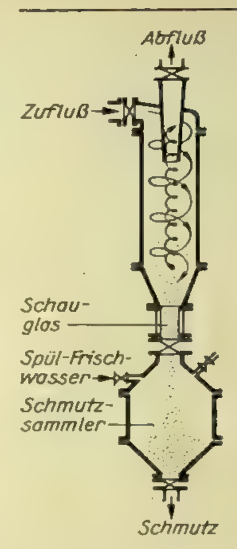


Abb. 7.4.2-3 Hydrozyklon

Verwertung der Sulfitablauge. Die Hälfte der Rohstoffsubstanz ist in der Ablauge gelöst. Je Tonne Zellstoff fallen 8 bis 9 m^3 Ablauge an. Die Hauptinhaltsstoffe sind neben anorganischen Salzen, die aus den Aufschlußchemikalien stammen, Ligninsulfonate, Zucker und deren Abbauprodukte. Die Ablaugen werden teilweise verbrannt, wobei eine Chemikalienrückgewinnung erfolgt. Eine biologische Verwertung ergibt sich durch Vergärung der Zuckerbestandteile zu Äthanol und Verhefung zu Futterhefe. Ablauge wird auch als Bindemittel bei der Brikettierung von Kohle und Koksstaub, zur Mischfutterpelletierung und als Kernbindemittel in Gießereien benutzt.

Sulfatzellstofferzeugung. *Sulfatzellstoff* entsteht durch Kochen pflanzlicher Rohstoffe, vorwiegend Holz, mit einer Lauge aus Ätznatron und Natriumsulfid. Der Begriff „Sulfatzellstoff" wurde geprägt, da das Natriumsulfid der Kochlauge durch Reduktion von Natriumsulfat entsteht, das bei der Regenerierung zugesetzt wird. Nach dem *Sulfatverfahren* können alle pflanzlichen Rohstoffe (Nadel-, Laubhölzer, Stroh) aufgeschlossen werden. Auch die harzreiche Kiefer, die beim sauren Aufschluß erhebliche Schwierigkeiten bereitet, wird mit hohem Anteil verarbeitet. Die *Holzvorbereitung* erfolgt mit Hackmaschinen (vgl. Abb. 7.4.2-1).

Kochprozeß. Die Kochung der Hackschnitzel kann diskontinuierlich oder kontinuierlich, ähnlich dem Sulfitverfahren, erfolgen. Als *Kochlauge* dient ein Gemisch mit NaOH und Na_2S als wesentlichste Bestandteile.
Die diskontinuierliche Kochung wird in stehenden Kochern (≈ 200 m^3 Inhalt) mit Laugenumwälzung durchgeführt. Die Kochung läuft ebenfalls nach einem bestimmten Temperatur- und Druckdiagramm ab. Die Kochdauer beträgt 3 bis 4 h bei Temperaturen von ≈ 175 °C und Drücken von 8 bis $9 \cdot 10^5$ Pa. Das Entleeren der Kocher geschieht durch Ausblasen in druckfeste Diffuseure, in denen auch das Auswaschen stattfindet. Die anschließende Stoffaufbereitung erfolgt ebenso wie bei der Sulfitzellstofferzeugung.
Laugenregeneration und *Chemikalienrückgewinnung* sind bei der Sulfatzellstofferzeugung Voraussetzung für eine wirtschaftliche Produktion. In einem Sulfatzellstoffwerk dient etwa die Hälfte der technischen Einrichtungen zur Regenerierung der Ablauge. Die beim Waschvorgang anfallende Ablauge wird Mehrkörper-Verdampferanlagen zugeführt und durch Verdampfen Dicklauge mit einem Trockengehalt von 50 bis 60 % erzeugt. Mit dieser Konzentration kann die Dicklauge anschließend in einem Spezialverdampfer verbrannt werden. Während die organischen Bestandteile verbrennen und das Wasser verdampft, sammeln sich die anorganischen Salze in der Schmelze, die in einem Behälter zur Grünlauge aufgelöst wird. Zur Ergänzung der Alkaliverluste wird der Dicklauge Natriumsulfat zugesetzt, das im Verbrennungsraum zu Na_2S reduziert wird. Durch Kaustifizieren der Grünlauge mit Kalkmilch wird das Natriumkarbonat in Natronlauge überführt, die nun zur Wiederverwendung bei der Kochlauge dient.
Bleiche von Zellstoff. Ziel der Bleiche ist es, den Weißgrad des Faserstoffs zu erhöhen. Die Bleiche von Zellstoff ist eine Fortsetzung des Aufschlußprozesses; es werden die restlichen Ligninanteile und färbenden Substanzen entfernt. Als Bleichmittel wird vorwiegend Chlor benutzt. Die Bleiche kann als Einstufenbleiche in Bleichholländern erfolgen. Die steigenden Forderungen an die gebleichten Zellstoffe führten zur *Mehrstufenbleiche*, wobei die verschiedensten Kombinationen angewendet werden. Um den Prozeß kontinuierlich gestalten und mit hohen Stoffkonzentrationen arbeiten zu können, wird die *Turmbleiche* benutzt. Der Stoff durchläuft den Bleichturm, der eine Höhe von ≈ 20 m hat und aus korrosionsbeständigem Material besteht, von oben nach unten oder umgekehrt. Mit einer Mehrstufenbleiche können Weißgrade von 92 bis 95 % erreicht werden.
Eigenschaften und Verwendung von Zellstoff. Durch die Entfernung des Lignins und von Teilen der Hemizellulosen ist die Zellstoffaser elastisch und geschmeidig. Sie ist gut fibrillierbar und für die Papierherstellung besonders geeignet. Im Vergleich zu Holzstoff weist Zellstoff höhere Festigkeitseigenschaften auf. Ungebleichter Sulfatzellstoff besitzt hohe Festigkeitseigenschaften und wird deshalb zur Herstellung von Sack-, Kraft- und Packpapier eingesetzt. Hochwertige weiße Papiere mit geringer Vergilbungsneigung werden ausschließlich aus gebleichtem Zellstoff hergestellt.
Bei Mischungen mit Holzstoff und Altpapierstoff wird durch die Zellstoffkomponente vor allem die notwendige Festigkeitseigenschaft gebracht.

7.4.3. Technologie der Altpapieraufbereitung

Aufgrund des steigenden Bedarfs an Papier, Karton und Pappe und der begrenzten Rohstoffbasis erhöht sich der Anteil an Altpapier am Gesamtfaserstoff ständig. Er liegt bereits heute bei 45 bis 50 %. Nach der Erfassung wird das Altpapier vorsortiert und die gröbsten Unreinheiten werden entfernt. In diesem Zustand wird es, zu Ballen gepreßt, der Papierfabrik angeliefert.
Die Aufbereitung von Altpapier zu Altpapierstoff besteht in einer Freilegung der Fasern und restlosen Beseitigung artfremder Bestandteile, wie Plaste, Schnüre, Drähte, Gummi, Textilien usw.
Naßaufbereitung. Bei der Naßaufbereitung erfolgt die Auflösung kontinuierlich und die Beseitigung des Unrats in gelöstem Zustand. Eine Naßaufbereitungsanlage setzt sich aus mehreren Einzelaggregaten mit jeweils spezifischen Aufgaben zusammen. Das Altpapier wird in einem Stofflöser (Abb. 7.4.3-1) aufgelöst. Der Stofflöser besteht aus einem Stahlgefäß, in dem zur Turbulenzerzeugung ein Rotor mit hoher Drehzahl rotiert. Die Auflösung geschieht dabei unter

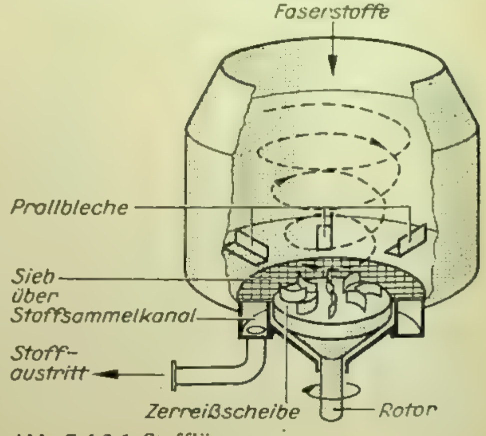


Abb. 7.4.3-1 *Stofflöser*

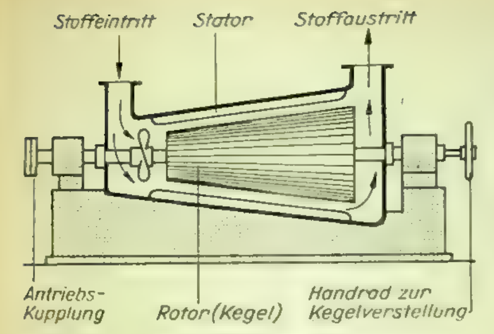


Abb. 7.4.3-2 *Kegelmühle*

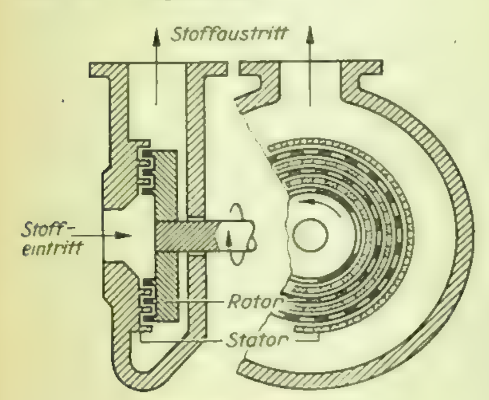


Abb. 7.4.3-3 *Entstipper*

dem Einfluß der Turbulenz bei 2,5 bis 3,5% Stoffdichte. Die Abführung des aufgelösten Altpapierstoffs erfolgt über gelochte Siebbleche. Altpapier-Stofflöser sind zusätzlich mit Einrichtungen zur Unratentfernung (Zopfwinde) ausgerüstet.

Der im Stofflöser zerfaserte Stoff wird verschiedenen Reinigungsstufen unterzogen. Die Entfernung von Schwerteilen, wie Glas, Heftklammern, Sand usw., erfolgt in Hydrozyklonen (vgl. Abb. 7.4.2-3). Zur Beseitigung kleinerer Verunreinigungen werden nach einer Verdünnung verschiedene Sortiermaschinen eingesetzt, z. B. Plansortierer (vgl. Abb. 7.4.1-5). Der sortierte Stoff wird eingedickt und anschließend entstippt. Die *Entstippung* dient der völligen Zerkleinerung der noch im Stoff enthaltenen Faserbündel und der Freilegung der Einzelfaser. Als Entstipper werden Kegelmühlen (Abb. 7.4.3-2, Tafel 26) sowie spezielle Maschinen (Abb. 7.4.3-3) eingesetzt.

Aufbereitung schwer auflösbarer Altpapiere. In Stofflösern wird das naßfeste, bituminierte und kunststoffbeschichtete Altpapier zerkleinert und gelangt über einen Hydrozyklon (vgl. Abb. 7.4.2-3) zur Eindickung auf 25 bis 30% Trokkengehalt. Anschließend wird es in einer Heißzerfaserungsanlage auf 90 bis 150°C erwärmt und durch Knetung zerfasert.

Deinking-Verfahren. Ein großer Teil des Altpapiers fällt in bedrucktem Zustand an. Durch das Deinking-Verfahren wird die Druckfarbe ohne Faserschädigung von den Fasern getrennt. Zur Druckfarbeentfernung wird das Flotationsverfahren verwendet (Abb. 7.4.3-4), wobei feine Luftbläschen an die Druckfarbeteilchen angelagert und anschließend flotiert werden.

7.5. Technologie der Papierstoffaufbereitung

Stoffaufbereitung. In diesem Prozeßabschnitt werden die Papierfaserstoffe und -hilfsmittel in einen Zustand überführt, in dem der Gesamtstoff für die Papierherstellung geeignet ist. Es handelt sich dabei um das Zerfasern und Mahlen der Faserstoffe, das Mischen der Stoffkomponenten sowie das Leimen, Füllen und Färben des Papierstoffs. Der Zusatz von Hilfsstoffen erfolgt zur Erzielung bestimmter Eigenschaften des Papiers.

Zerfasern. Unter Zerfasern wird das Zerlegen eines Faserverbands durch mechanische Behandlung nach völliger Durchfeuchtung in wäßriger Suspension in kleinere Einheiten, möglichst der Einzelfaser, verstanden. Sofern die Papierfabriken über keine eigene Zellstoff- oder Holzstoffabrik verfügen, werden die Faserstoffe in feuchtem oder getrocknetem Zustand angeliefert. Ferner ist das Altpapier sowie der eigene Papierausschuß zu zerfasern. Das Zerfasern erfolgt in *Stofflösern* (vgl. Abb. 7.4.3-1, Tafel 26) bei 3 bis 8% Stoffdichte. Der Faserstoff wird in 10 bis 20 min in eine pumpfähige Suspension überführt.

In älteren Betrieben wird noch der *Holländer* benutzt. Es ist eine Vielzweckmaschine und

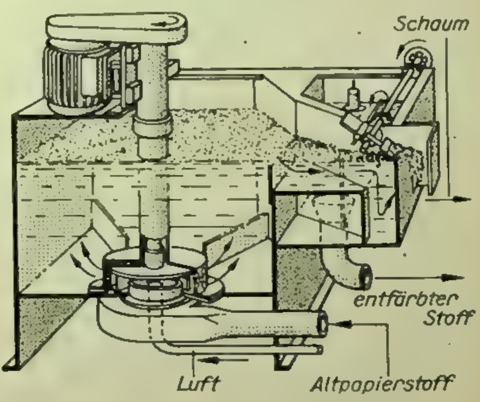


Abb. 7.4.3-4 *Flotationszelle*

dient zum Zerfasern, Entstippen, Mahlen, Füllen Färben, Leimen und Mischen.

Mahlen. Die Faserstoffe, vor allem der Zellstoff, werden vor der Blattbildung gemahlen. Der Mahlvorgang ist ein Zerkleinerungsvorgang. Bei der Mahlung werden dem Faserstoff die gewünschten Abmessungen verliehen, durch Fibrillierung die spezifische Oberfläche der Faser vergrößert und ein bestimmter Hydratations- bzw. Quellungsgrad erzielt. Die Faser ist damit für eine gleichmäßige, homogene Blattbildung geeignet. Der Faserstoff erfährt außerdem dabei eine bestimmte Festigkeitsentwicklung. Eine Mahlung wird bewirkt, indem die Faserstoffsuspension zwischen 2 Messerpaaren hindurchgeführt und dabei je nach Messerabstand, dem Mahlspalt, mehr oder weniger stark behandelt wird. Ein großer Mahlspalt führt zu einer geringen Einwirkung und es entsteht ein röscher bzw. gröberer Stoffcharakter, ein geringer Mahlspalt dagegen zu einem schmierigen Stoffcharakter bzw. zu einer starken Kürzung der Fasern. Die Mahlung erfolgt in Kegel- (vgl. Abb. 7.4.3-2, Tafel 26) oder Scheibenmühlen (vgl. Abb. 7.4.1-4). Bei den *Kegelmühlen* rotiert ein mit Messern bestückter Kegel in einem Stator in Kegelform, der ebenfalls mit Messern bestückt ist. Die Messer bestehen meist aus rostfreiem Stahl. Bei den *Scheibenmühlen* wird der Stoff zwischen einer feststehenden und einer rotierenden Scheibe oder zwischen 2 gegenläufig rotierenden Scheiben, die beide mit einem Mahlprofil versehen sind, hindurchgedrückt. Am zweckmäßigsten wird im Hochkonsistenzbereich von 30 bis 35% Trockengehalt gemahlen.

Leimen ist das Zufügen von Hilfsstoffen zur Stoffmasse, wobei eine Hydrophobisierung des Fasergefüges erreicht wird. Dem Eindringen von wäßrigen Flüssigkeiten wird damit ein Widerstand entgegengebracht; das Papier wird beschreibbar. Bei der *Masseleimung* werden die Leimungsmittel während der Stoffaufbereitung kontinuierlich dem Stoffstrom zugesetzt. Es werden vorwiegend Harzleime, aber auch Stärke, synthetischer Leim, Tierleim und Wachse, zur Leimung benutzt. Durch Zugabe von Aluminiumsulfat werden die Harzpartikeln auf der Oberfläche der Faser niedergeschlagen.

Füllen ist das Zufügen von mineralischen Stoffen kleiner Teilchengröße zum Papierstoff vor der Blattbildung. Durch die Füllstoffe werden die Lücken zwischen den Fasern geschlossen sowie bestimmte Papiereigenschaften erzielt, wie z. B. höherer Weißgrad, höhere Opazität, geschlossenere Oberfläche, bessere Bedruckbarkeit. Außerdem wird ein Teil des teureren Faserstoffs durch den billigeren Füllstoff ersetzt. Als Füllstoffe werden wasserunlösliche, mineralische Stoffe mit Teilchengrößen von 0,1 bis 40 μm verwendet. Die gebräuchlichsten Füllstoffarten sind Silikate (Kaolin), Sulfate (Bariumsulfat), Karbonate (Kalziumkarbonat), Oxide (Titandioxid). Dem Papierstoff werden je nach Papiersorte 2 bis 40% Füllstoff zugesetzt.

Färben. Mit dem Färben wird der Grundton eines Papiers durch Zugabe von Farbstoffen oder Pigmenten auf einen bestimmten Farbton gebracht. Beim *Färben in der Masse* wird der Papierstoff während der Aufbereitung mit Farbstoff versetzt, beim *Oberflächenfärben* wird das fertige Papier durch *Tauchen* oder *Streichen* gefärbt. Zum Färben werden basische, saure und substantive Farbstoffe sowie Pigmente verwendet. Eine Sonderstellung nehmen die optischen Aufheller ein, chemische Verbindungen, die UV-Licht in sichtbares blaues Licht umwandeln und dadurch den Weißgrad erhöhen.

7.6. Technologie der Papier-, Karton- und Pappenherstellung

7.6.1. Blattbildung als einlagiges Vlies

Papiermaschine. Der aufbereitete Stoff wird nach einer Verdünnung auf ≈ 1% Stoffdichte nochmals in Hydrozyklonen und Drucksortierern gereinigt und liegt nun vor der Papiermaschine als Faserstoffsuspension mit 99 Teilen Wasser und 1 Teil Stoff vor. Auf der Papiermaschine wird daraus durch Entwässerung das Flächengebilde „Papier" hergestellt (Abb. 7.6.1-1, Tafel 27).

Stoffauflauf. Damit ein gleichmäßiges Papierblatt entsteht, muß die Stoffsuspension in homogener

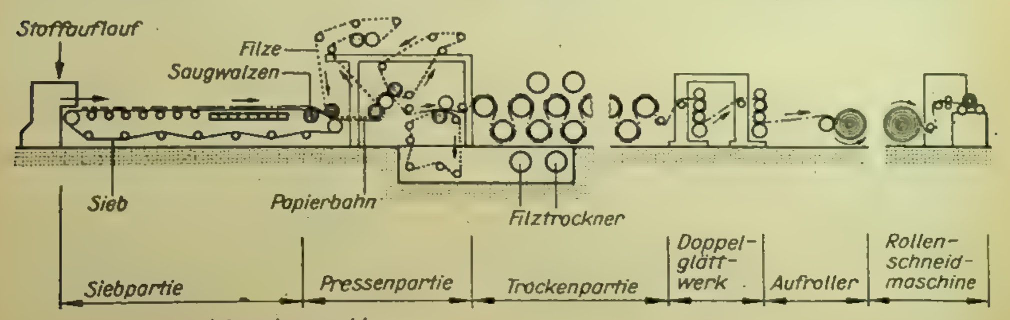


Abb. 7.6.1-1 Langsiebpapiermaschine

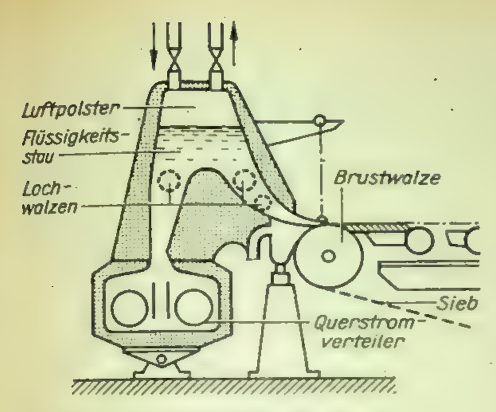


Abb. 7.6.1-2 Hochdruck-Stoffauflauf

Verteilung und bestimmter Menge auf das *Langsieb* auflaufen. Dazu werden preßluftgesteuerte Hochdruck-Stoffaufläufe (Abb. 7.6.1-2) verwendet. Die Austrittsgeschwindigkeit der Suspension wird durch den Druck im Stoffauflauf reguliert.

Siebpartie. In der Siebpartie wird die Blattbildung und Entwässerung des Papierstoffs eingeleitet. Die aus dem Stoffauflauf austretende Stoffsuspension mit 0,5 bis 1,0% Stoffdichte trifft auf ein umlaufendes Sieb (vgl. Abb. 7.6.1-1) und hat nach dem Durchlauf der Siebpartie durch Filtration einen großen Teil des Wassers verloren. Im Sieb befinden sich Entwässerungselemente, die den Wasserentzug unterstützen. In Maschinenlaufrichtung sind die Brustwalze, mehrere Registerwalzen, Entwässerungsleisten, die sog. Foils, Flachsauger sowie die Saugwalze angeordnet (Tafel 27). All diese Entwässerungselemente umspannt das endlose Sieb, das aus Phosphorbronze oder Kunststoff besteht.

Pressenpartie (Tafel 27). Die vom Sieb kommende Papierbahn hat einen Trockengehalt von ≈ 20%. Da eine höhere Entwässerung über die Filtration nicht zu erreichen ist, wird die feuchte Papierbahn zwischen 2 Preßwalzen verdichtet und dabei entwässert. Die Papierbahn wird vom Sieb zur Pressenpartie durch eine Saugabnahme (*Pick-up-System*) überführt. In der Pressenpartie sind je nach Papiersorte 2 bis 4 Pressen angeordnet. Die untere Walze ist eine Saugwalze. Die obere Walze besteht aus Grauguß, Granit oder speziellen Kunststoffen und wird hydraulisch oder pneumatisch angepreßt. Die Papierbahn durchläuft, auf einem Naßfilz liegend, die Presse. Die Aufgabe des Naßfilzes besteht in der Entwässerung und Weiterführung der feuchten, empfindlichen Papierbahn. Am Ende der Pressenpartie beträgt der Trockengehalt 40 bis 45%. Neben der Saugpresse werden eine Reihe von Spezialpressen, z. B. Siebtuch-, Venta-Nip-, Offsetpresse, angewendet.

Trockenpartie. Der Entwässerung durch Pressen sind wirtschaftliche Grenzen gesetzt. Das Restwasser wird in der Trockenpartie verdampft. Die Trocknung erfolgt auf rotierenden Trockenzylindern von 1,5 bis 1,8 m Durchmesser, die innen mit Dampf beheizt werden. Die Papierbahn wird mit Hilfe von Trockenfilzen zum besseren Wärmeübergang an die Zylinderoberfläche gedrückt. Eine Trockenpartie hat, je nach Trockenleistung, 40 bis 60 Trockenzylinder, die in 2 Reihen (vgl. Abb. 7.6.1-1) angeordnet sind. Das Papier wird auf einen Trockengehalt von 93 bis 95% gebracht.

Den Abschluß der Papiermaschine bilden das *Glättwerk* und die *Aufrollung*. Im Glättwerk wird die Papierbahn auf eine bestimmte Dicke verdichtet und die Glätte gesteigert. Dazu durchläuft das Papier meist 5 bis 8 Hartgußwalzen, die hydraulisch oder pneumatisch angepreßt werden. Zur Aufrollung der fertigen Papierbahn (Tafel 27) werden hauptsächlich Tragtrommelroller benutzt.

7.6.2. Blattbildung als mehrlagiges Vlies

Auf der Langsiebpapiermaschine wird das Papierblatt in *einer* Lage gebildet. Zur Herstellung von Karton und Pappe müssen *mehrere* Lagen miteinander im feuchten Zustand zusammengegautscht werden (*mehrlagiges Vlies*). Dazu werden *Rundsiebmaschinen* (Abb. 7.6.2-1) in teilweiser Kombination mit Langsieben verwendet. Ein mit einem Sieb bespannter Hohlzylinder läuft in einem mit der Faserstoffsuspension gefüllten Trog. Durch den Druckunterschied zwischen dem Flüssigkeitsniveau im Trog und im Zylinderinneren wird die Blattbildung bewirkt. Je Rundsieb werden Flächengebilde von 40 bis 80 g/m^2 Masse je Flächeneinheit geschöpft. Die Papierbahn wird durch einen Abnahmefilz vom Siebzylinder abgenommen und zum nächsten Rundsieb transportiert, wo eine Vereinigung mit

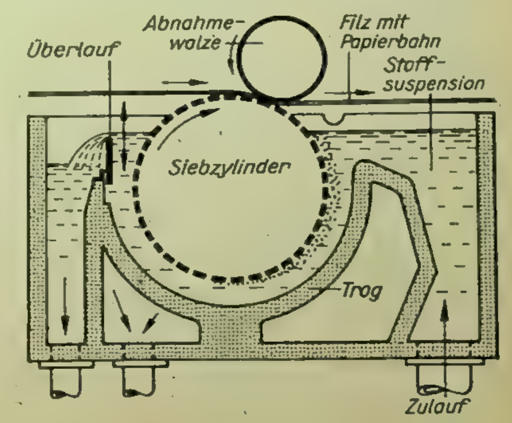


Abb. 7.6.2-1 Gleichstrom-Rundsieb

der dort gebildeten Bahn stattfindet. Durch eine größere Anzahl von Rundsieben ist die Herstellung mehrlagiger Kartone und Pappen bis zu einer Masse je Flächeneinheit von 1000 g/m^2 möglich. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 130 bis 150 m/min. Bei höheren Geschwindigkeiten treten Störungen in der Blattbildung auf. Zur Vermeidung dieser Nachteile wurden das *teilbeaufschlagte Rundsieb* und der *Rundsiebformer* (Abb. 7.6.2-2) entwickelt. Beim Rundsiebformer erfolgt die Blattbildung auf einem begrenzten Sektor eines Rundsiebzylinders. Durch einen Saugkasten wird die Entwässerung beschleunigt. Rundsiebformer gestatten Geschwindigkeiten bis 300 m/min.

7.7. Technologie der Papierausrüstung

Papierausrüstung. Nachdem das Papier die Papiermaschine verlassen hat, gelangt es in die *Ausrüstung*, wo es endgültig fertiggestellt wird. Je nach Art und Verwendungszweck des Papiers bestehen dabei verschiedene Möglichkeiten. Die 4 wesentlichen Varianten der Fertigstellung sind:
- maschinenglattes Rollenpapier,
- satiniertes Rollenpapier,
- maschinenglattes Formatpapier,
- satiniertes Formatpapier.

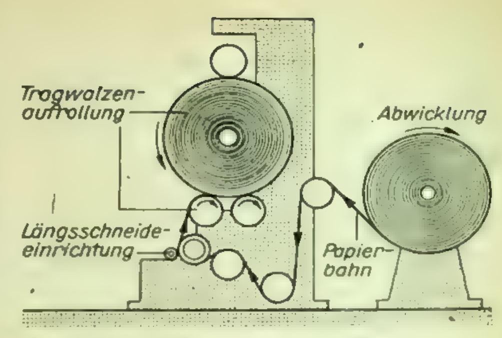


Abb. 7.7.0-1 Rollenschneidmaschine

Vorrollen. Um ein reibungsloses und wirtschaftliches Arbeiten an den sich anschließenden Ausrüstungsmaschinen zu gewährleisten, werden die Papiere, insbesondere Rollenpapiere, oft vorgerollt. Das geschieht, indem die von der Papiermaschine kommenden Tamboure auf Vorrollern umgerollt werden, wobei Fehler in der Papierbahn, wie Flecke, Einrisse, Löcher, Falten und dergleichen, ausgeschieden und die an den Seiten verlaufenden Rollen geradegerichtet werden. Die Bahn wird endlos gemacht.
Rollenschneiden. Die vorgerollten bzw. direkt von der Papiermaschine kommenden maschinenbreiten Tamboure werden in der Rollenschneidmaschine (Abb. 7.7.0-1) in Rollen mit bestimmter Breite und bestimmtem Durchmesser aufgeschnitten. Gleichzeitig wird dabei das Papier mit der erforderlichen Härte aufgewickelt und endlos

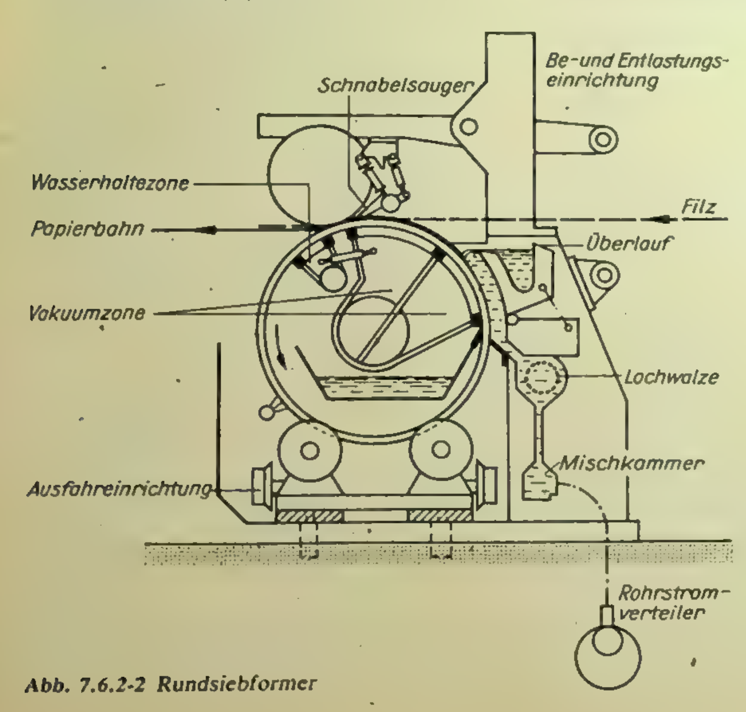


Abb. 7.6.2-2 Rundsiebformer

gemacht. Die Längsschneideeinrichtung besteht aus Obermesser (Kreismesser) und Untermesser (Nutmesserwalze). Die Kreismesser können zur jeweiligen Schnittstelle verschoben werden. Die Nutmesserwalze ist mit Messerbüchsen besetzt.

Feuchten ist notwendig, um die zu glättende Papierbahn für den Satiniervorgang geschmeidig und elastisch zu gestalten und um zu erreichen, daß die dem Papier unter dem Druck der Kalanderwalzen aufgezwungene Gefügeverdichtung beibehalten wird. Dies kann entweder auf der Papiermaschine, in Rollenschneidmaschinen mit Feuchteinrichtungen oder auf speziellen Feuchtmaschinen geschehen.

Satinieren. Unter *Satinage* versteht man den Durchgang von Papier oder Karton zwischen Walzen zur Steigerung der Glätte und des Glanzes durch Ausgleich von Unebenheiten. Das Satinieren erfolgt in speziellen Maschinen, den *Kalandern* (Abb. 7.7.0-2). Der Kalander besteht aus einem kräftigen Gestell, in dem eine Reihe von Walzen (6 bis 20 Stück) übereinanderliegend angeordnet sind. Die oberste und die unterste Walze sind größere Hartgußwalzen. Dazwischen liegen abwechselnd je eine Papier- (elastische Walze *E*) und eine Hartgußwalze (*H*).

Formatschneiden. Formatpapiere werden auf Querschneidern hergestellt. Der Querschneider übt dabei 2 Funktionen aus, die Erzeugung des Längs- und des Querschnitts. Der Längsschnitt teilt die maschinenbreiten Rollen in Laufrichtung in die entsprechenden Bahnbreiten. Durch den Querschnitt werden die Bahnen quer zur Laufrichtung auf die gewünschte Formatlänge geschnitten. In modernen Querschneidern wird das Gleichlauf-Schneidsystem angewendet, bei dem scherenartig mit 2 rotierenden Quermessern geschnitten wird.

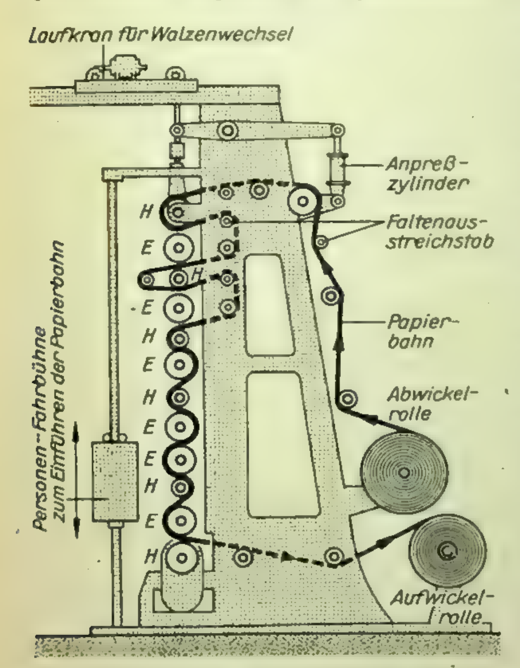


Abb. 7.7.0-2 Rollenkalander mit 12 Walzen

Sortieren, Zählen und *Verpacken* sind die abschließenden Arbeitsgänge der Ausrüstung. In modernen Betrieben erfolgen Sortieren und Zählen heute maschinell. Rollenpapiere werden in Rollenpackmaschinen verpackt. Formatpapiere werden auf Paletten gestapelt, mit Packpapier eingeschlagen und mit Bandeisen umreift.

7.8. Veredeln von Papier

Das Ausrüsten der Papiere umfaßt all die Arbeitsgänge, die den Prozeß der Papierherstellung vollenden. *Veredeln* heißt, durch spezielle Behandlungen, z. B. durch Streichen, Imprägnieren, Kaschieren, Beschichten usw., den Papieren zusätzliche Eigenschaften zu verleihen und damit ihren Gebrauchswert zu erhöhen.

Streichen von Papier. Gestrichene Papiere sind solche, die durch ein- oder doppelseitige Oberflächenbehandlung mit einem aus Pigment und Bindemitteln und gegebenenfalls weiteren Zusätzen bestehenden Aufstrich versehen sind. Als Pigmente werden China Clay, Bariumsulfat (Blanc fixe), Titandioxid, Zinkweiß, Kalziumkarbonat, Satinweiß und Talkum verwendet, als Bindemittel u. a. Kasein, Stärke, Tierleim, Kunststoffdispersionen, Zelluloseleim. Nach dem Streichen werden die Papiere in der üblichen Weise satiniert und ausgerüstet. Durch den Auftrag werden die Unebenheiten des Rohpapiers ausgefüllt und eine geschlossene Oberfläche gebildet. Auf diese Weise erhält das Papier beste Druckeigenschaften, wie punktscharfe Wiedergabe von Drucken, Glanz und besondere dekorative Wirkungen.

Das Streichen kann inner- oder außerhalb der Papiermaschine durchgeführt werden. Außerhalb der Papiermaschine einseitig gestrichene Papiere werden gewöhnlich als *Chromo-*, doppelseitig gestrichene Papiere als *Kunstdruckpapier*, in der Papiermaschine gestrichene Papiere als *maschinengestrichen* bezeichnet.

8. Fertigungstechnik

Die Fertigungstechnik als Teil der Wissenschaft Technologie befaßt sich mit der Werkstoffbearbeitung und der Gestaltung des technologischen Prozesses. Mit der Gesamtheit der Verfahren zur Bearbeitung von Werkstoffen dient sie der Herstellung geometrisch bestimmter fester Körper, wie Gebrauchsgegenstände, Geräte, Maschinen u. a. Erzeugnisse. In diesem Hauptkapitel werden die Fertigungsverfahren zur Bearbeitung metallischer Werkstoffe behandelt. In bezug auf die Plast- und Elastwerkstoffe sei auf das Hauptkapitel 5 verwiesen.

Als *technologischer Prozeß* wird der Prozeß der Formgebung bezeichnet, der mit dem Gestalten des Werkstoffs beginnt und mit der Fertigstellung der Gebrauchsform, dem Fertigerzeugnis, endet. Dieser Prozeß vollzieht sich in mehreren Stufen, wobei die verschiedenartigsten Fertigungsverfahren angewendet werden. Ein *Fertigungsverfahren*, das als Einheit von Verfahrens-(Wirk-)Prinzip, Werkzeug und Maschine oder Anlage betrachtet wird, zeichnet sich durch eine Vielzahl von Eigenschaften aus, wie die herstellbare Formenvielfalt oder Hauptgeometrie, die zu ändernden Werkstoffeigenschaften, die einhaltbaren Grenzen für bestimmte Form-, Maß- und Eigenschaftsanforderungen, die herstellbare Produktionsmenge, der erforderliche Aufwand an Werkzeugen, Maschinen, Vorrichtungen u. a. (Fertigungsaufwand). Im technologischen Prozeß wirken die Fertigungsverfahren in sinnvoller Reihenfolge auf das Werkstück ein. Im *Rohteilherstellungsprozeß* erhält der Werkstoff seine Urform, z. B. Gußblock, -teil, bzw. werden Hüttenprodukte, Halbzeuge, zu Umformteilen weiterbearbeitet. Dies geschieht ausnahmslos mittels der spanlosen Fertigungsverfahren Urformen und Umformen. Die Weiterbearbeitung des Rohteils im *Einzelteilfertigungsprozeß* erfolgt vorwiegend mittels spanender Verfahren bis zum Fertigteil, das dem *Montageprozeß* zugeführt wird. Entsprechend dem gesellschaftlichen Bedürfnis gilt es, immer mehr zuverlässige Gebrauchswerte höchster Qualität effektiv herzustellen. Die Fertigungstechnik hat deshalb die Aufgabe, die Werkstoffbearbeitbarkeit zu untersuchen, Fertigungsverfahren effektiv anzuwenden und durch Einflußnahme auf die optimale Wahl und Gestaltung von Fertigungsmitteln, wie Werkzeuge und Maschinen, weiterzuentwickeln, Verfahren und Werkstoffe zu substituieren, die fertigungsgerechte Konstruktion von Einzelteilen, Baugruppen und Fertigerzeugnissen zu beeinflussen und die notwendigen Kennwerte für den wirtschaftlichsten technologischen Prozeß vorauszubestimmen.

Die Fertigungsverfahren werden in 6 Hauptgruppen unterteilt:

1. *Urformen*: Fertigen eines geometrisch bestimmten festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts, z. B. durch Gießen oder Pulverpressen.
2. *Umformen*: Bildsame (plastische) Formänderung eines festen Körpers unter Beibehaltung der Masse und des Zusammenhalts, z. B. durch Pressen, Schmieden, Walzen, Ziehen u. a.
3. *Trennen*: Formänderung eines festen Körpers durch örtliches Aufheben des Zusammenhalts seiner Teilchen, z. B. durch Scheren, Schneiden, Spanen, Abtragen durch chemische und chemisch-physikalische Verfahren, durch elektrische Entladungen (Funkenerosion), Laserstrahlen oder bei zusammengesetzten Körpern durch Lösen der Verbindungen (Zerlegen).
4. *Fügen*: Zusammenbringen von 2 oder mehr Werkstücken unmittelbar, z. B. Zusammenlegen, Füllen, Einpressen, Falzen, Reibschweißen, mit Hilfe von Verbindungselementen, z. B. Schrauben, Nieten, oder unter Verwendung von formlosen Zusatzwerkstoffen, z. B. Schweißen, Löten, Kleben u. a.
5. *Beschichten*: Aufbringen einer fest haftenden Schicht auf ein Werkstück als Metall-, Farb-, Lack-, Plast-, Oxidschicht u. a. zum Korrosionsschutz und für dekorative Zwecke.
6. *Stoffeigenschaftsändern*: Verändern der Werkstoffeigenschaften eines festen Körpers durch Umlagern, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen, z. B. Glühen, Härten, Anlassen, Auf- oder Entkohlen, Nitrieren u. a.

In enger Wechselwirkung zwischen praktischen Produktionserfahrungen und naturwissenschaftlicher Anwendungsforschung wachsen Anzahl und Arten der Fertigungsverfahren ständig, um den immer neuen konstruktiven Forderungen hinsichtlich Kompliziertheit der Gestalt, Größe

der Abmessungen, Bearbeitung hochwarmfester, überharter und neuer nichtmetallischer Werkstoffe, Qualität der Oberflächen, Einhaltung kleiner Toleranzen zu entsprechen.

8.1. Urformen

Nach dem Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff treten die Stoffeigenschaften bestimmbar in Erscheinung. Je nach der Art des formlosen Stoffs unterscheidet man Urformen aus dem gas- oder dampfförmigen, dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen, dem ionisierten und dem festen, z. B. körnigen oder pulverigen, Zustand. Die Urformverfahren sind in der Fertigungstechnik die erste Stufe der Formgebung mit der größten Freizügigkeit des Gestaltens aller Fertigungsverfahren. Für die Metallverarbeitung am bedeutendsten ist das *Urformen aus dem flüssigen/breiigen Zustand* (vgl. 3.5), wie *Gießen, Pressen*, sowie aus dem *pulverigen Zustand*, z. B. *Pulverpressen* (vgl. 3.4). Das Urformen von hochpolymeren Werkstoffen wird im Hauptkapitel 5 behandelt.

Beim *Gießen flüssiger Stoffe* in eine vorbereitete Form unterscheidet man entsprechend der Nutzung und der Einwirkung von Kräften *Schwerkraft-, Fliehkraft-* und *Druckkraftgießen* (vgl. 3.5.2.). Hergestellt werden entweder Vorerzeugnisse für Halbzeuge oder Halbzeuge, die noch eine wesentliche Gestaltsänderung in der Weiterbearbeitung erfahren, sowie dem Fertigteil weitestgehend nahekommende Formteile.

8.2. Umformen

Umformen ist das Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei werden sowohl die Masse als auch der Stoffzusammenhalt beibehalten. Fast alle bildsamen metallischen Werkstoffe lassen sich aufgrund ihres kristallinen Aufbaues i. allg. recht günstig umformen. Der Werkstoff setzt der plastischen Formänderung einen bestimmten Umformwiderstand entgegen, der abhängig ist von der Umformtemperatur und teilweise von der -geschwindigkeit. Mit höheren Temperaturen sinken die Festigkeitswerte des Werkstoffs, während die Umformbarkeit zunimmt (Kalt- und Warmumformung, vgl. 3.6.1.). Der Umformvorgang vollzieht sich unter Einwirkung äußerer Kräfte oder Momente. Grundlage für die Gliederung der Umformverfahren ist die Beanspruchungsart (vgl. Abb 3.6.1-1): Druck, Zug, Biegung, Schub, Torsion. Diese Beanspruchungsarten treten meist in verschiedenen Kombinationen auf. Bezüglich der Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen, wie Profile, Bleche, Rohre, als Walzwerkserzeugnisse wird auf Kapitel 3.6. verwiesen.

8.2.1. Maschinen der Umformtechnik

Pressen. Sie besitzen eine geradlinige Hauptbewegung, ihre Gestelle sind entweder offene Gestelle mit C-Form oder geschlossene Rahmengestelle mit O-Form in Guß- oder Stahlschweißbauweise.

Mechanische Pressen (Abb. 8.2.1-1). *Exzenterpressen* sind in der blechbearbeitenden Industrie und in Gesenkschmieden sehr häufig. Durch eine verdrehbare Exzenterbuchse zwischen -zapfen und Pleuel kann der Hub des in 2 nachstellbaren Führungsbahnen gleitenden Stößels verstellt werden. Der Pressentisch ist fest oder verstellbar. Auf *Exzenter-Gesenkschmiedepressen* werden einfache Werkstücke, wie Zahnradroh-

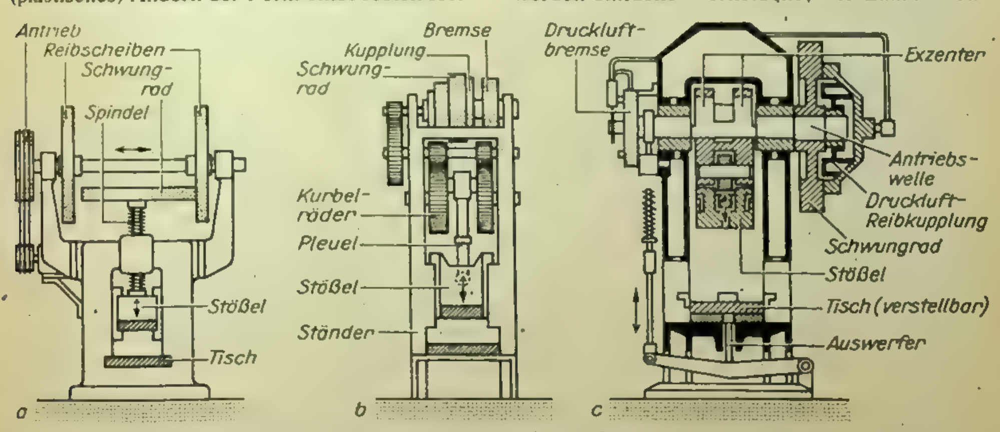


Abb. 8.2.1-1 Mechanische Pressen: links Reibrad-Spindelpresse, Mitte Zweiständer-Kurbelpresse, rechts Zweiständer-Exzenterpresse

linge, Ringe, Pleuelstangen, Hebel u. a., in einem Hub durch Umformung in einem Gesenk hergestellt.
Bei *Kurbelpressen* bleibt der Stößelhub unveränderlich. Der Stößel ist über ein Pleuel mit der Schwungmasse verbunden und muß immer seine Tiefstellung durchlaufen (Tafel 30). Nach dem Werkzeugraum und der Kraftwirkung werden Zweiständer-Kurbelpressen mit Ein-, Zwei- und Vierpunktsystem ausgeführt, um außermittige Belastungen zu ermöglichen.
Kniehebelpressen besitzen ein Kniehebelgetriebe für die Hauptbewegung des Stößels und sind für die Massivumformung von großer Bedeutung. Sie sind besonders für das Prägen und das Kaltumformen relativ flacher Werkstücke geeignet. Aufgrund der besseren Automatisierbarkeit sind diese Pressen den Hämmern leicht überlegen.
Reibrad-Spindelpressen vereinigen die Druckwirkung eines Pressenstößels mit der Schlagwirkung, wie sie mit dem Hammer erreicht wird. Der Hub ist variierbar. Deshalb sind sie für das Richten, Prägen, Stauchen, Gesenkbiegen, Gesenkformen geeignet.
Tiefziehpressen besitzen für die Hauptbewegung des Ziehstößels ein Schubkurbel- oder Schleppkurbelgetriebe sowie ein Kniehebel- bzw. Kurvengetriebe für die Nebenbewegung des Blechhalterstößels. Die meisten dieser Pressen sind mit einem Zweigeschwindigkeitsantrieb ausgerüstet, der unter Beibehaltung der zulässigen Ziehgeschwindigkeit die Hubzahl erhöht. Tiefziehpressen werden für die Herstellung von Karosserieteilen, Gehäusen, Verkleidungen, Behältern u. ä. eingesetzt.
Kurbel-Abkantpressen dienen der wirtschaftlichen Fertigung von Blechprofilen. Das Doppelständergestell in Stahlschweißbauweise hat unterschiedliche Weiten zwischen den Ständern. Die Hubzahl läßt sich entsprechend den technologischen Bedingungen einstellen. Mit zusätzlichen Werkzeugen können außerdem Arbeitsgänge, wie Biegen, Drücken, Prägen, ausgeführt werden.
Mechanische Sonderpressen sind *Revolver-Schneidpressen*, die mittels mehrerer Schneidwerkzeuge in einem Revolverkopf eine Vielzahl von verschiedenen Durchbrüchen in rascher Folge aus Blechen ausschneiden. Der Antrieb entspricht im Prinzip dem einer kurzhubigen, schnellaufenden Kurbelpresse.
Nuten-Schneidpressen, automatisiert mit Speicher- und Fördereinrichtungen, werden im Elektromaschinenbau zur Herstellung großer Stückzahlen von Rotor- und Statorblechen eingesetzt.
Hydraulische Pressen. In ihnen wird die Umformkraft durch hydraulischen Druck von Pumpen erzeugt. Dadurch können Kraft und Geschwindigkeit an den Arbeitsvorgang beim Umformen angepaßt werden. Die Stößelhubhöhe ist leicht und einfach einzustellen. Nach den Antriebsarten ist zwischen Pressen mit elektro-hydraulischem und mit reinhydraulischem Antrieb zu unterscheiden. Bekannt sind *einfachwirkende Ein-* und *Zweiständerpressen* zum Biegen, Richten, Prägen, Ziehen flacher Teile und Schneiden sowie *hydraulische Abkant-* und *Tiefziehpressen*.
Automaten für Blechformteile sind hinsichtlich Grundaufbau und Wirkungsweise mechanische Pressen, jedoch mit vollselbsttätigem Arbeitsablauf (Tafel 30). Das Bandmaterial wird dem Werkzeug durch Genauigkeitsgreifer-Vorschubapparate zugeführt. Für ein Werkzeug geeignet sind *Einstößel-Schneid-* und *Umformautomaten*, für mehrere Werkzeuge *Stufenumformautomaten*.
Fließpressen. Für das Fließpressen werden *mechanische Kurbelpressen* in Zweiständerbauart, *hydraulische Pressen* in Doppel- und in Zweiständerbauart sowie *Kniehebel-Fließpreßautomaten* eingesetzt. Hydraulische Pressen sind besonders bei großen Hüben vorteilhaft, außerdem steht die volle Preßkraft über den gesamten Arbeitsweg zur Verfügung und die Arbeitsgeschwindigkeit ist stufenlos regelbar. Fließpreßautomaten dienen vorwiegend dem Kaltfließpressen von Stahl o. a. Werkstoffen. Der Arbeitsablauf ist für das Zuführen, bei mehrstufigem Umformen für das Weitergeben, das Auswerfen und Abführen der fließgepreßten Werkstücke automatisiert. Verkettet mit *Platinen-* und *Knüppelscheren* können diese Automaten in hochproduktiven Fertigungsstraßen eingesetzt werden.
Stauchmaschinen. *Kaltstauchautomaten* sind liegende Kurbelpressen für die Massenfertigung von Schraubenrohlingen, Nieten, Nägeln u. a. Zu unterscheiden sind Ein- und Mehrzweckautomaten, die als Ein-, Zwei- oder Mehrstufen-Stauchautomaten gebaut werden. Bei Zweistufen-Stauchautomaten ist im Gegensatz zum Einstufen-Stauchautomaten ein zusätzlicher Antrieb für den Wechselschieber erforderlich, in dem die 2 Stempel für Vor- und Fertigstauchen befestigt sind. Mehrstufen-Stauchautomaten arbeiten wie Einstufen-Stauchautomaten, d. h., nach jeder Kurbelwellenumdrehung ist ein Werkstück fertiggestellt. Mittels Zangengreifer wird das Werkstück nach jeder Arbeitsstufe in eine andere Matrize gefördert.
Schmiedemaschinen. *Freiformschmiedepressen* werden hydraulisch angetrieben und zur Herstellung schwerer Schmiedestücke aus Blöcken eingesetzt. Bei niedriger Formänderungsgeschwindigkeit wird in einer Stufe eine hohe Formänderung erreicht. Bauarten sind *Einständerschmiedepressen*, *Zweisäulen-Unterflurschmiedepressen* und *Viersäulen-Oberflurschmiedepressen*. Der elektro-ölhydraulische Pumpenantrieb wird wegen der Feuergefahr nur

bei Unterflurpressen angewendet, sonst wird Druckwasserantrieb mit Akkumulator verwendet.

Freiformschmiedehämmer erfordern im Vergleich zu den Pressen einen wesentlich höheren Energieaufwand, erreichen nur geringe Formänderungen in einer Stufe und sind gut für kleine Schmiedestücke geeignet.

Fallhämmer (Abb. 8.2.1-2), bei denen der Bär nur durch die Erdanziehung beschleunigt wird, haben eine niedrige Schlagzahl. Beim *Riemenfallhammer* wird der Bär mit Riemen angehoben, im *Brettfallhammer* trägt der Bär ein Brett, an dem er durch 2 angetriebene Andruckrollen durch Reibung hochgezogen wird. Im *Luftfallhammer* wird der Bär mit Druckluft gehoben, die in einem eingebauten Kompressor selbst erzeugt wird. Beim *Oberdruckhammer* wird durch Dampf- oder Luftdruck aus dem Betriebsnetz eine zusätzliche Beschleunigung des Bären erreicht. Die Vorteile der Hämmer sind: sofortige Einsatzbereitschaft, niedriger Energiebedarf und geringe Betriebskosten. Sie werden in Einständer- und Zweiständer-Bauarten, je nach Bärmasse, gebaut.

Der *Gegenschlaghammer* hat 2 Bären gleicher Masse, die mechanisch miteinander gekoppelt sind und sich beim Schlag aufeinander zu bewegen. Zum Aufnehmen der Stoßwirkung benötigt er keine *Schabotte*, einen Amboßunterbau von mindestens 20facher Bärmasse, und wird deshalb vorwiegend bei großen Gesenkschmiedestücken eingesetzt. Hilfseinrichtungen zum Halten und Ergreifen großer Werkstücke sind *Manipulatoren* oder *Wendeketten* beim Freiformschmieden.

Waagerecht-Stauchmaschinen (Horizontalschmiedemaschinen) werden zur Serienfertigung von Schmiedestücken wirtschaftlich eingesetzt. Das erwärmte Rohteil wird zwischen die geteilten Klemmbacken eingeführt und durch den beweglichen Klemmbacken festgeklemmt. Durch den senkrecht dazu bewegten Stößel, den Stauchschlitten, erfolgt das Umformen des Werkstücks. Die Klemmbacken können 3 bis 4 Werkzeuge mit mehreren Gravuren aufnehmen, wodurch das Formen des Werkstücks in einer Wärme in mehreren Stufen nacheinander möglich ist. Man unterscheidet Waagerecht-Stauchmaschinen mit senkrecht geteilten bzw. waagerecht geteilten Klemmbacken.

Feinschmiedemaschinen werden in vertikaler als auch horizontaler Bauform gebaut. Sie haben 3 bis 4 Hämmer, die radial auf das rotierende Werkstück einwirken. Im Hammerkasten befinden sich die Exzenterwellen, die ihre Drehbewegung auf die geführten Pleuel übertragen, an denen sich die Hämmer befinden. Mittels einer Exzenterbuchse lassen sich die Hübe der Hämmer so verstellen, daß unterschiedliche Durchmesser gefertigt werden können. Durch den Einsatz numerischer Steuerungen werden Feinschmiedemaschinen auch für kleinere Losgrößen wirtschaftlich. Vorteile des Feinschmiedens sind die Werkstoffeinsparung, hohe Fertigungsgenauigkeit und Verringerung der Stückzeit.

Biegemaschinen. *Abkantmaschinen* gibt es von kleinen handbedienten bis zu automatisierten Maschinen. Das Blech wird auf der höhenverstellbaren Unterwange durch die ebenfalls höhenverstellbare Oberwange gespannt. Die schwenkbare Biegewange biegt das freie Blechende um die Schiene an der Oberwange (Abb. 8.2.1-3). Mit programmgesteuerten Abkantmaschinen können Biegewinkel und Anschläge für das Blech vorgewählt werden, die Steuerung erfolgt über einstellbare Nocken.

Blechbiegemaschinen biegen Blech zwischen 3 oder 4 Biegewalzen, die eine Druckkraft aus-

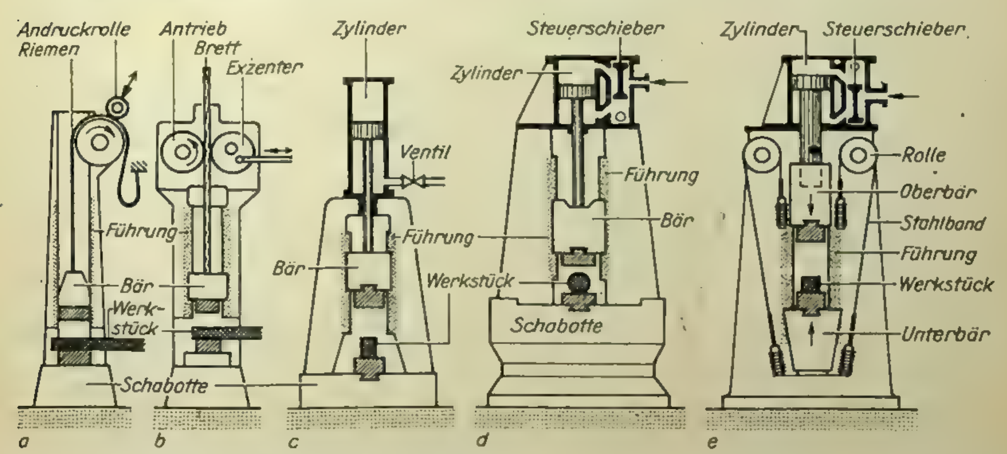


Abb. 8.2.1-2 *Schmiedehämmer:* ***a*** *Riemenfall-,* ***b*** *Brettfall-,* ***c*** *Luftfall-(Aufzug-),* ***d*** *Oberdruckhammer,* ***e*** *Gegenschlaghammer ohne Schabotte*

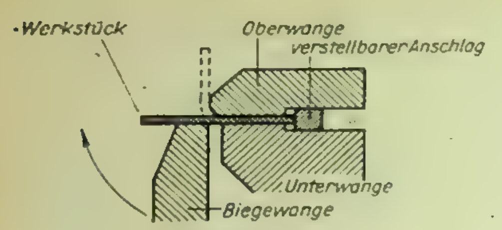


Abb. 8.2.1-3 Schwenkbiegen

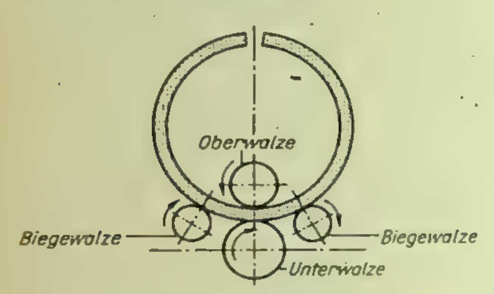


Abb. 8.2.1-4 Vierwalzenbiegen

üben. Es lassen sich zylindrische und keglige Formen herstellen.
Dreiwalzen-Blechbiegemaschinen arbeiten meist mit 2 unverstellbaren angetriebenen Unterwalzen und einer in vertikaler Richtung verstellbaren Oberwalze, die in 2 Ständern gelagert sind. Zum Abziehen eng gerundeter Blechzylinder ist ein Lager der Oberwalze schwenkbar konstruiert. Blechenden werden bei dieser Bauart nicht vollständig gebogen. Deshalb besitzen kleine Blechbiegemaschinen eine einstellbare Unterwalze, die Seiten- oder Biegewalze, größere Maschinen Zusatzeinrichtungen zum Anbiegen und Richten. Bei *Vierwalzen-Blechbiegemaschinen* wird dies vermieden. Unter- und Seitenwalzen sind über einen eigenen Antrieb unter Last zustellbar, während die angetriebene Oberwalze unverstellbar gelagert ist (Abb. 8.2.1-4).
Rohrbiegemaschinen, in vielen Industriezweigen eingesetzt, können ohne Füllung durch Kaltbiegen einfache Rohrbögen, schraubenförmige Rohre, Rohrschlangen und Werkstücke mit mehreren Biegungen in einer oder mehreren Ebenen herstellen. Zusätzliche Stützdorne verhindern in der Biegezone die Faltenbildung. Durch weitere Zusatzeinrichtungen und durch numerische Steuerungen ist der Automatisierungsgrad bis zum selbsttätigen Arbeitsablauf erhöhbar.
Profilwalzmaschinen gestatten durch Kaltwalzen das Herstellen von Profilen auf rotationssymmetrischen Werkstücken, wie Gewinde, Verzahnungen, Kerbverzahnungen, Rändel und Profile mit geometrisch unterschiedlicher Gestalt. Außerdem können sie für das *Flach-Querwalzen* (Glattwalzen) und Richten eingesetzt werden. Moderne Maschinen gestatten das Arbeiten im Einstech- und im Durchlaufverfahren.
Beim *Einstechverfahren* werden die Rundwerkzeuge radial zum Werkstück zugestellt, ohne daß das Werkstück axial verschoben wird. Die zu walzende Profillänge wird durch die Breite der Rundwerkzeuge begrenzt. Das *Durchlaufverfahren* wird bei Gewinden, die aufgrund ihrer Länge im Einstechverfahren nicht gewalzt werden können, eingesetzt. Durch Schrägstellen der Werkzeugachsen und/oder durch Werkzeuge mit einem Steigungswinkel wird das Werkstück axial zwischen den Rundwerkzeugen bewegt. Die Rundwerkzeuge tragen das Negativ des zu walzenden Profils, das über den Walzenumfang gleichbleibt. Mit automatischer Werkstückzuführung und -abführung ist die gradweise Automatisierung und die Verkettung in Fertigungsstraßen gewährleistet. Um die Vorzüge des *Profil-Querwalzens* auch für schwer kaltumzuformende Werkstoffe zu nutzen, sind halbautomatische *Zahnradwarmwalzmaschinen* entwickelt worden. Das *Walzen mit Flachbacken* wird vorwiegend zum Walzen von Spitzgewinde an Schrauben und Rändelungen benutzt. Das Werkstück wird entweder zwischen einem ortsfesten Werkzeug und einem über einen Kurbeltrieb angetriebenen Flachbacken umgeformt oder zwischen gegenläufig bewegten Flachbakken.

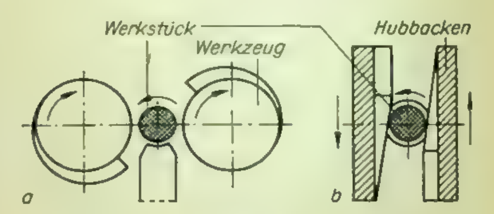


Abb. 8.2.1-5 Querwalzen mit keilförmigen Werkzeugen: a umlaufende, b auf- und abgehende Werkzeuge

Querwalzmaschinen walzen rotationssymmetrische Werkstücke mit keilförmigen Werkzeugen (Abb. 8.2.1-5). Unterscheiden kann man Maschinen mit umlaufenden Werkzeugen und mit auf- und abgehenden Werkzeugen auf Hubbacken. Vorteile der Bauart mit Hubbacken sind die konstante Werkzeuggeschwindigkeit, der konstante Werkzeugabstand und die leichtere Herstellung der Werkzeuge. Querwalzmaschinen haben eine hohe Arbeitsproduktivität. Die Werkstücke werden fast abfallslos produziert, komplizierte Werkstückformen lassen sich in kürzester Zeit herstellen. Der Faserverlauf im Werkstoff wird nicht unterbrochen, sondern z. T. verdichtet, wodurch sich die Festigkeit erhöht.

Druckumformen ist das Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im wesentlichen durch ein- oder mehrachsige Druckbeanspruchung herbeigeführt wird. Infolge der Druckkraftwirkung fließt der Werkstoff in Richtung des geringsten Widerstands. Die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug behindert den Werkstofffluß, verursacht einen größeren Arbeitsbedarf beim Umformen und bewirkt den Verschleiß der Werkzeuge.

Freiformen ist ein Druckumformen mit nicht oder nur teilweise die Form des Werkstücks enthaltenden, gegeneinander bewegten Werkzeugen. Die Werkstückform entsteht dabei durch freie oder festgelegte Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Freiformen ist in der Regel eine Warmumformung. Die entsprechend zugeschnittenen Halbzeuge werden dazu in gas- oder ölbeheizten Öfen auf die Umformtemperatur gebracht. Beim Freiformen sind Maß- und Formgenauigkeit meist gering, die Bearbeitungszugaben relativ groß.

Recken ist das wichtigste Freiformverfahren, bei dem der Querschnitt bzw. die Dicke eines Werkstückes schrittweise vermindert und der Werkstoff vorwiegend in Längsrichtung verdrängt wird. Anwendungsbeispiele für das Rekken sind das *Schlichten* zum Erreichen glatter Oberflächen, das *Aufweiten* zum Vergrößern von Hohlkörpern und Ringen, das *Beihalten* zum Ausgleichen unerwünschter Breitungen und das *Absetzen* zum Erzeugen sprunghafter Querschnittsverminderungen (Abb. 8.2.2-1).

Beim *Rundkneten (Feinschmieden)* werden volle oder hohle lange Werkstücke, wie Stäbe oder Rohre, durch 2 oder mehrere weggebundene Werkzeuge, die gleichzeitig radial wirken und

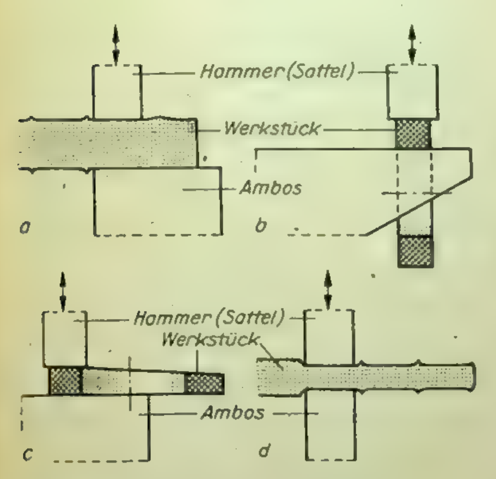


Abb. 8.2.2-1 Beispiele für das Recken: a Schlichten, b Aufweiten, c Beihalten, d Absetzen

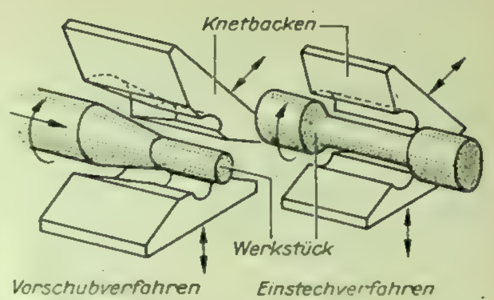


Abb. 8.2.2-2 Rundkneten

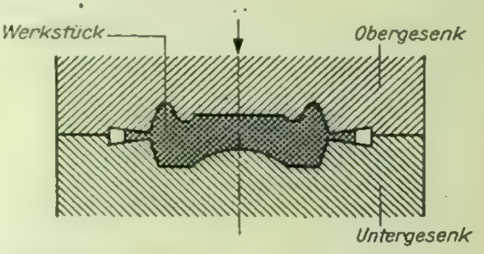


Abb. 8.2.2-3 Formpressen mit Grat (Gesenkschmieden)

relativ zum Werkstück umlaufen, im Querschnitt vermindert (Abb. 8.2.2-2).

Stauchen erfolgt meist zwischen ebenen, parallelen Wirkflächen. Das Werkstück wird in seiner Höhe verringert, der Querschnitt vergrößert und die Mantelflächen aufgewölbt. Angewendet wird das Stauchen für das *Flachprägen* (Glatt- und Maßprägen) sowie für das weitverbreitete *Anstauchen* zum örtlichen Stoffanhäufen an einem Werkstück, z. B. das Kopfanstauchen an einer Stange. Insbesondere für große Werkstoffanhäufungen an dünnen Stäben wendet man eine örtliche elektrische Widerstandserwärmung an, um die Umformkräfte niedrig zu halten. Kontinuierliches Erwärmen und Nachschieben des Werkstoffs zur Vergrößerung der Anstauchung sind möglich. Weitere Freiformverfahren sind das *Breiten, Treiben, Schweifen* und *Dengeln*.

Gesenkformen (*Gesenkschmieden*) ist ein Druckumformen mit gegeneinander bewegten Formwerkzeugen, den Gesenken, die das Werkstück ganz oder zu einem wesentlichen Teil umschließen. Umgeformt werden vorgewärmte Halbzeugabschnitte. Neben der Anwendung *offener Gesenke* werden am häufigsten *Gesenke mit Gratspalt* eingesetzt (Abb. 8.2.2-3). Der Grat dient der Druckregulierung, dem Ausfüllen der Formen und nimmt überflüssigen Werkstoff auf. Er muß nachträglich entfernt werden. Im geschlossenen Gesenk fällt der Grat weg, der Werkstoff muß jedoch genau vordosiert werden, damit die Gesenkform ausgefüllt wird. Die teue-

ren Gesenke werden aus hochlegierten, warmfesten Stählen gefertigt. Das Gesenkformen ermöglicht gute Maß- und Formgenauigkeit, geringere Bearbeitungszugaben und enge Toleranzen.

Walzen ist ein stetiges oder schrittweises Druckumformen mit einem oder mehreren sich drehenden oder hin- und hergehenden Werkzeugen (Walzen oder Backen), z. T. unter Nutzung von Zusatzwerkzeugen, wie Stopfen, Dorne, Stangen. Beim *Längswalzen* wird das Walzgut senkrecht zu den Walzachsen ohne Drehung durch den Walzspalt bewegt (vgl. 3.6.2.).

Beim *Querwalzen* wird das Walzgut ohne Bewegung in Achsrichtung um die eigene Achse gedreht. Haben die mit dem Walzgut in Berührung stehenden Walzflächen die Form von Kreiszylinder- oder Kegelmänteln, so spricht man von *Flachquerwalzen (Querglattwalzen)*. Dieses Verfahren benutzt man, um maß- und formgenaue Außenflächen zu erhalten. Mit keilförmigen Werkzeugen, die sich aus Führungs-, Umform- und Kalibrierflächen zusammensetzen, wird beim *Profil-Querwalzen* (Tafel 15) durch Warmmassivumformung pro Umdrehung bzw. einem Hub der Umformwerkzeuge mindestens ein Werkstück hergestellt. Die Werkzeugelemente wälzen auf der Oberfläche des meist in Induktionsöfen erwärmten Halbzeugabschnitts ab und erteilen diesem eine Rotationsbewegung (vgl. Abb. 8.2.1-5). Typische Profilierungen sind mehrfach abgesetzte Wellen mit senkrechten oder abgerundeten Kanten, Kugel- und Kegelmantelflächen. Das *Schrägwalzen* ist ein Walzen, bei dem das Walzgut um die eigene Achse gedreht wird und eine Axialbewegung des Werkstücks, der Längsvorschub, durch Schrägstellen der Walzen zustande kommt, wie z. B. beim *Durchlauf-Gewindewalzen* (Tafel 30) oder Schrägwalzen von Kugeln. Ein Profil-Schrägwalzen von Hohlkörpern über einen sich drehenden Dorn zur Verringerung der Wanddicke des Hohlkörpers mittels eines gleitenden oder antriebsfrei abrollenden Werkzeugs ist das *Drückwalzen* (Abb. 8.2.2-4). Beim Verringern der Wanddicke wird gleichzeitig die Mantelhöhe vergrößert. Entsprechend der Werkstofffflußrichtung unterscheidet man *Gleichlauf-* (in Vorschubbewegung der Rollen) und *Gegenlauf-* (entgegen der Rollenvorschubbewegung) *Drückwalzen*. Beim *Glattrollen* werden glatte, zylindrische Rollen mit einer Vorschubbewegung an der Oberfläche des rotierenden Werkstücks entlanggeführt und die Oberfläche dadurch geglättet und verfestigt. Mit Hilfe von Zusatzeinrichtungen ist das Glattrollen auf Drehmaschinen möglich. Mit dem *Projizierdrückwalzen* werden ebene Zuschnitte, Ronden, in einen Hohlkörper oder vorgeformte Hohlkörper zu Hohlkörpern mit kleinerem Umfang bei Verringerung der Wanddicke umgeformt (Abb. 8.2.2-5).

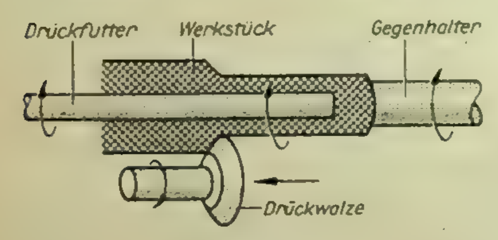


Abb. 8.2.2-4 Drückwalzen

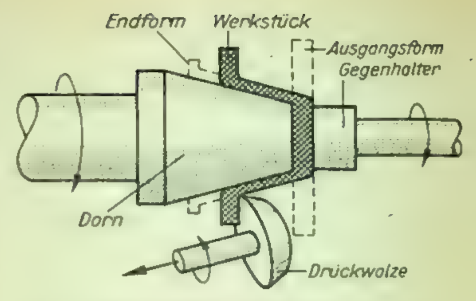


Abb. 8.2.2-5 Projizierdrückwalzen (-streckdrücken)

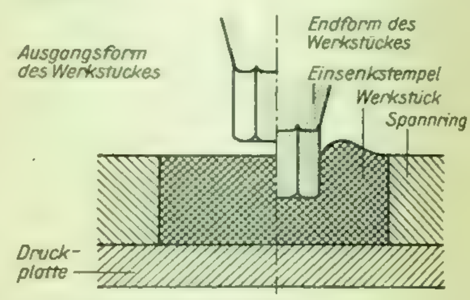


Abb. 8.2.2-6 Kalteinsenken

Eindrücken ist ein Druckumformen mit einem Werkzeug, das örtlich in ein Werkstück eindringt. Beim *Körnen, Kerben, Einprägen, Prägerichten* und *Dornen* sowie beim *Einsenken* wird das Werkzeug in geradliniger Bewegung eingedrückt, ohne daß sich das Werkstück bewegt. Der Einsenkstempel dringt beim Kalteinsenken mit nur 0,002 bis 0,2 mm/s in das Werkstück ein und erzeugt sehr genaue Innenformen (Abb. 8.2.2-6). Bekannte Verfahren des Eindrückens mit umlaufender Werkzeugbewegung sind das *Walzprägen, Rändeln, Kordeln, Gewindeformen* und *Glattdrücken*.

Durchdrücken ist ein Druckumformen eines Werkstücks durch teilweises oder vollständiges Hindurchdrücken durch eine formgebende Werkzeugöffnung unter Verminderung des Querschnitts oder Durchmessers. Beim *Verjüngen* werden Werkstücke unter kleiner Formänderung durchgedrückt, z. B. Einstoßen eines Stabs oder Rohrs als Vorbereitung für das Durchziehen. Das Verjüngen von Vollkörpern

wird auch *Reduzieren*, das von Hohlkörpern *Einhalsen* genannt. *Strangpressen* dient vorzugsweise dem Erzeugen von Halbzeugen, vgl. 3.6.5.

Fließpressen (Abb. 8.2.2-7) wird als Warm- oder Kaltformverfahren durchgeführt und dient der Herstellung von Hohl- und Vollkörpern. Je nach Richtung des Werkstoffflusses zur Richtung der Stempelbewegung wird unterschieden zwischen *Vorwärtsfließpressen*, bei dem der Werkstofffluß in Stempelrichtung erfolgt, *Rückwärtsfließpressen*, bei dem der Werkstofffluß der Stempelbewegung entgegen gerichtet ist, und *Querfließpressen*, wo der Werkstofffluß senkrecht zur Richtung der Stempelbewegung erfolgt. Als Ausgangsformen werden volle oder gelochte Scheiben und flache Näpfe verwendet. Die erreichbaren Maß- und Formgenauigkeiten sowie Oberflächenrauhtiefen genügen hohen Anforderungen. Hergestellt werden dünnwandige Behälter aus weichen NE-Metallen, z. B. Zinkbecher für galvanische Elemente, Aluminiumleiter und Stahlteile. Zur Minderung des schnellen Verschleißes der aufwendigen Matrizen wird geschmiert.

8.2.3. Zug-Druckumformen

Bei dieser Art des Umformens eines festen Körpers wird der plastische Zustand im wesentlichen durch eine zusammengesetzte Druck- und Zugbeanspruchung bewirkt.

Durchziehen. Ein stabförmiges Werkstück aus Stahl oder NE-Metall unterschiedlichen Querschnitts wird durch ein formgebundenes Ziehwerkzeug durchgezogen und dabei im Querschnitt verringert. Durch axiale Zug- und radiale Druckspannungen im Ziehwerkzeug erfolgt die Umformung (Abb. 8.2.3-1). Bis zur Fertigform sind in der Regel mehrere Züge durch Ziehwerkzeuge mit immer kleinerem Düsendurchmesser erforderlich. Man spricht vom *Gleitziehen* bei starren Ziehwerkzeugen und vom *Walzziehen* beim Einsatz mehrerer frei drehbarer Walzen. Nahtlose Rohre werden durch *Stopfenzug* im Durchmesser und in der Wanddicke verringert (Abb. 8.2.3-2).

Beim *Rohrziehen* ohne Innenwerkzeug (*Hohlzug*) wird der Durchmesser reduziert, die Wanddicke kaum. Das Ziehen mit langer und mitlaufender Dornstange (*Stangenzug*) wird bei dünnwandigen Rohren und großen Formänderungen angewendet. Nach dem Zug muß der Dorn vom Rohr durch ein Aufweitewalzwerk gelöst werden. Die Oberflächengüte nach dem Durchziehen ist von der Güte der Ziehwerkzeuge, von der Oberflächenbeschaffenheit des Strangs vor der Umformung und von der Schmierung abhängig. Die Werkzeuge bestehen aus Werkzeugstählen, Hartmetall- oder Diamantwerkzeugeinsätzen und besonders beim Ziehen dünner Drähte aus Keramikwerkstoffen.

Tiefziehen dient zur Umformung ebener Zuschnitte zu einem offenen Hohlkörper ohne beabsichtigte Veränderung der Dicke des Zuschnitts zwischen 2 Werkzeugelementen, dem Ziehstempel und dem Tiefziehring. Vielfach werden Niederhalter eingesetzt, um u. a. der Faltenbildung zu begegnen. Sind Stempel und Ziehring starr, spricht man vom *Tiefziehen mit starrem Werkzeug* im Gegensatz zum *Tiefziehen mit nachgiebigem Werkzeug*, wo entweder der Stempel oder die Ziehmatrize, das Kissen, aus flexiblem Stoff, z. B. Gummi, bestehen. Beim *Tiefziehen mit Wirkmedien* (Flüssigkeiten, Gase) wird z. B. der Blechzuschnitt durch Wirkung des Mediums in eine starre Matrize hineingezogen oder an einen starren Stempel angelegt. Das Tiefziehen vollzieht sich bei Raum-

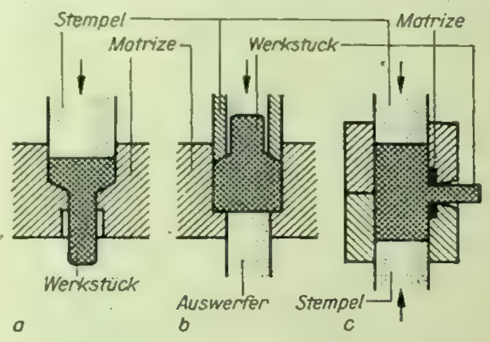


Abb. 8.2.2-7 Fließpressen: a Voll-Vorwärts-, b Voll-Rückwärts- und c Voll-Querfließpressen

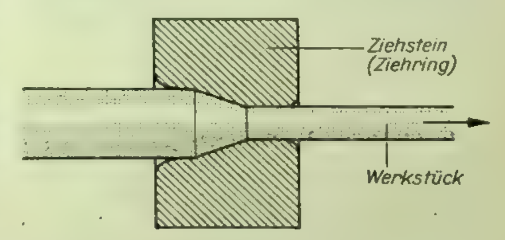


Abb. 8.2.3-1 Gleitziehen von Vollkörpern

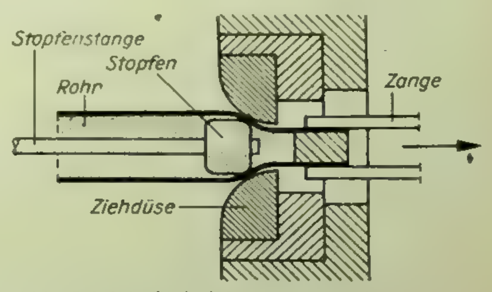


Abb. 8.2.3-2 Gleitziehen von Hohlkörpern über festen Stopfen

temperatur. Häufig sind mehrere Tiefziehvorgänge erforderlich, um ein Fertigteil zu erhalten, da das Ziehverhältnis Boden- zu Napfdurchmesser durch die in der Mantelringfläche übertragbare Tiefziehkraft begrenzt ist (Abb. 8.2.3-3).

Drücken. Unter Drücken versteht man das Zug-Druckumformen eines Zuschnitts zu einem Hohlkörper oder das Verändern des Umfangs eines Hohlkörpers, wobei ein Werkzeugteil, die Drückform oder Drückfutter, die Form des Werkstücks enthält und mit diesem umläuft. Das Gegenwerkzeug, die Drückwalze oder der Drückstock, greift nur örtlich an. Drückverfahren sind *Sicken*, *Gewindedrücken*, *Drücken* von *Außen-* und *Innenborden*, *Aufweiten*, *Einhalsen*.

8.2.4. Zugumformen

Hierbei wird durch eine ein- oder mehrachsige Zugbeanspruchung der plastische Zustand herbeigeführt und ein fester Körper umgeformt. Beim *Längen* wirkt die Zugkraft in der Werkstücklängsachse, wodurch die Werkstückabmessung in Kraftrichtung vergrößert wird (*Strecken*) oder Verbiegungen an Stäben und Rohren sowie Beulen an Blechen beseitigt werden können (*Streckrichten*). Das *Weiten* dient dem Vergrößern des Umfangs eines Hohlkörpers entweder an seinen Enden (*Aufweiten*) oder in der Mitte des Hohlkörpers (*Ausbauchen*) mittels starrer oder nachgiebiger Außen- bzw. Innenwerkzeuge, wie Stempel und Dorne. Wie beim Tiefziehen ist das *Weiten* mit *Wirkmedien*, wie Sand, Stahlkugeln, Flüssigkeiten und Gasen, möglich.

8.2.5. Biegeumformen

Das Fließen in der Umformzone bewirkt überwiegend ein Biegemoment, das durch eine von außen aufgebrachte Zug- oder Druckbeanspruchung oder durch ein Drehmoment hervorgerufen wird. Beim *freien Biegen*, *Gesenkbiegen*, *Gleitziehbiegen*, *Rollbiegen* und *Knickbiegen* führen die Werkzeugteile eine geradlinige Bewegung aus. Während sich beim freien Biegen die Werkstückform frei ausbildet, wird beim *Gesenkbiegen* das Werkstück zwischen Biegestempel und -gesenk bis zur Anlage des Werkstücks im Gesenk umgeformt. Je nach Ausbildung des Gesenks kann man *Gesenkrunden*, *-sicken* und *-bördeln* unterscheiden.

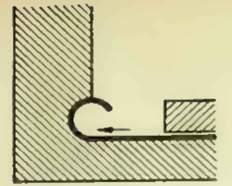


Abb. 8.2.5-1 Rollbiegen eines Scharniers

Unter *Rollbiegen* versteht man das stetige Biegeumformen eines Werkstücks durch Hineinstoßen z. B. eines Blechstreifens oder Rohrs in ein Werkzeug mit gekrümmter Wirkfläche (Abb. 8.2.5-1).

Walzbiegen ist ein Biegeumformen mit drehender Werkzeugbewegung. Das Biegemoment wird durch Walzen aufgebracht. Anwendungsbeispiele sind das *Walzrunden* von Blechen, Stäben, Drähten oder Rohren zu zylindrischen, kegligen oder ringförmigen Werkstücken und das *Walzrichten* von Blechen, Stäben oder Rohren.

8.2.6. Sonderverfahren der Umformtechnik

Eine gewisse Sonderstellung innerhalb der Umformverfahren nehmen jene Verfahren ein, die durch schlagartiges Freiwerden hoher Energie Werkstücke herstellen. Infolge der hohen Umformgeschwindigkeit können Bleche, seltener massive Werkstücke, aus schwer umformbaren Werkstoffen bearbeitet werden, und zwar durch *Tiefen*, *Weiten*, *Tiefziehen*, *Gesenk-* und *Freiformen*. Der bei der Energiefreisetzung entstehende Druck wird entweder hervorgerufen durch Detonation eines Sprengstoffs oder Gas-

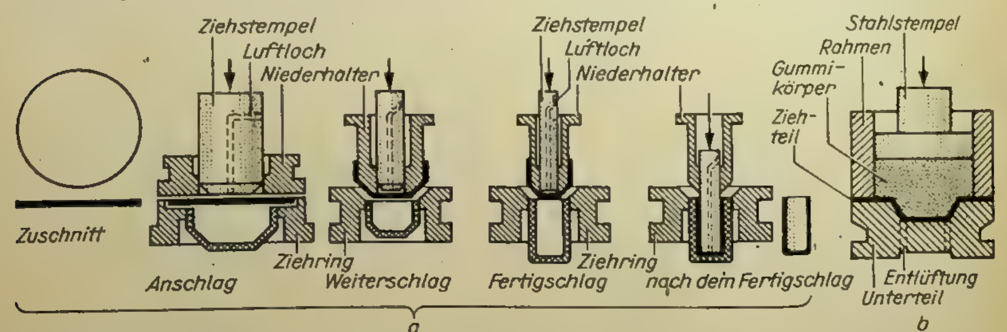


Abb. 8.2.3-3 Tiefziehen eines zylindrischen Hohlkörpers a mit starrem und b mit nachgiebigem Werkzeug (Gummistempel)

gemischs (*Explosivumformung*), durch elektrische Entladung (*Funkenentladung*), durch elektrische Entladung unter Wasser (*hydrostatisches Verfahren*), durch elektrische Entladung über eine Spule, verbunden mit impulsartigem Aufbau eines Magnetfelds (*Magnetumformung*) oder durch kurzzeitige Entspannung eines nicht brennbaren, hochkomprimierten Gases (*Expansionsverfahren*). Der Druckstoß wirkt entweder direkt auf das Werkstück ein oder indirekt über bewegliche Werkzeuge, z. B. Stempel einer Presse, Schmiedebär, bzw. Medien, wie Flüssigkeiten, Sand. Zur genauen Festlegung der Werkstückform werden starre Werkzeugteile eingesetzt, gegen die das umzuformende Blech gedrückt wird (Abb. 8.2.6-1).

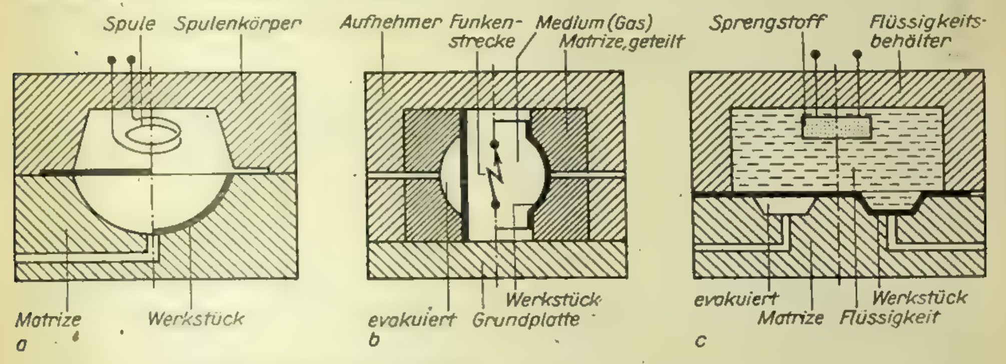


*Abb. 8.2.6-1 Hochenergieumformung, jeweils links die Ausgangs- und rechts die Endform des Werkstücks; **a** Tiefziehen durch Magnetumformung, **b** Weiten durch Funkenentladung, **c** Tiefen mit Flüssigkeiten durch Explosion*

8.3. Trennen

Unter dem Begriff *Trennen* wird in der Fertigungstechnik das Zerteilen, Spanen, Abtragen und Zerlegen zusammengefaßt. Beim *Spanen* werden Stoffteile, Späne, durch mechanische Kräfte vom Werkstück abgetrennt. Beim *Abtragen* erfolgt die Abtrennung der Stoffteilchen durch physikalisch-chemische Vorgänge, z. B. im Elektrolichtbogen oder durch Elektrolyse. Das Zerteilen und Zerlegen geschieht spanlos. Beim *Zerteilen* erfolgt das Trennen beispielsweise durch einen Schneidvorgang mit einer Schere. Das *Zerlegen* trennt Werkstücke im Sinne von auseinandernehmen, demontieren. Zum Trennen zählen auch das *Reinigen und Evakuieren*.

8.3.1. Zerteilen

Schneiden. ***Maschinenscheren***. Werkstoffe werden mittels *Scheren* geschnitten. Sie besitzen ein feststehendes Unter- und ein bewegliches Obermesser (Abb. 8.3.1-1). Das Kippen des Werkstücks wird durch Niederhalter verhindert. Bei Hebelscheren ist das Obermesser geneigt, bei Parallelscheren parallel zum Untermesser. Geneigte bzw. als logarithmische Spirale ausgebildete Obermesser bewirken einen nahezu konstanten Schneidwinkel zwischen Obermesser und Werkstück und damit konstante Schneidkräfte. Anstelle des Obermessers haben Blechscheren mitunter eine Schneidrolle oder 2 umlaufende Kreismesser zum Erzeugen nichtgerader Schnittverläufe, wie beispielsweise beim Ausschneiden von Kreisflächen mittels *Kreis-, Kurven-* oder *Rollenscheren*. Zum Teilen von Bändern in Streifen benutzt man *Streifenscheren* mit einem oder mehreren Sätzen von Kreismes-

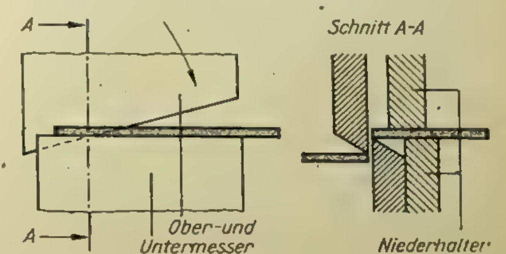


***Abb. 8.3.1-1** Schneiden mit der Blechschere*

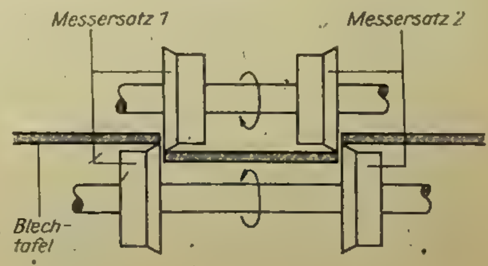


***Abb. 8.3.1-2** Streifenschere*

sern (Abb. 8.3.1-2). Große Blechtafeln bis 60 mm Dicke werden auf *Tafelscheren* geschnitten, die einen Tisch zum Auflegen des Werkstücks und einen Messerbalken mit Langmesser oder einen beweglichen Schlitten mit Kreismesser haben. Eine zusätzliche Hobeleinrichtung gestattet das Anhobeln von Schrägkanten zum Schweißen. Profilstähle, z. B. Winkeleisen, werden in *Profilscheren* geschnitten, deren Niederhalter und Messer dem Werkstückprofil angepaßt sind. Schwere *Knüppelscheren* in Walzwerken trennen Knüppel bei Querschnitten bis 220 mm Kantenlänge. Zum Ausschneiden von Durchbrüchen in Blechen oder beliebiger Blechformen werden *Aushauscheren* benutzt, die mit einem stempelförmigen Hubmesser arbeiten.

Schnittwerkzeuge werden bei der Massenfertigung anstelle von Aushauscheren eingesetzt. Das Schnittwerkzeug besteht beim *Freischnitt* aus dem profilierten Stempel und einer gleichprofilierten Schnittplatte, die das Eintauchen des Stempels mit geringem Spiel ermöglicht. Genaue Schnitte verlangen eine exaktere Führung des Stempels zur Schnittplatte. Dies wird durch eine zusätzliche Führung mit der *Führungsplatte* oder dem *Säulenführungsgestell* erreicht. Entsprechend der Arbeitsweise unterteilt man in *Umrißschnitt*, bei dem der Stempel eine definierte Form ausschneidet, *Folgeschnitt*, bei dem zunächst gelocht und nach einem bestimmten Vorschub ausgeschnitten wird, und *Gesamtschnitt*, bei dem das Lochen und Ausschneiden gleichzeitig erfolgt (Abb. 8.3.1-3).

Gummischnittwerkzeuge werden für dünne Leichtmetalle und Stahlbleche verwendet und sind durch die einfachere Schnittplatte, die Außenform, und den nichtprofilierten Stempel wesentlich billiger. Am Stempel befindet sich dabei ein Gummikissen, das das Werkstück über die geschärfte Kante der Schnittplatte drückt und dabei zerteilt.

Schneidautomaten werden für die Massenherstellung von Teilen eingesetzt. Sie verarbeiten meist bandförmiges Material von der Trommel mit großer Hubzahl und Genauigkeit, oft mittels

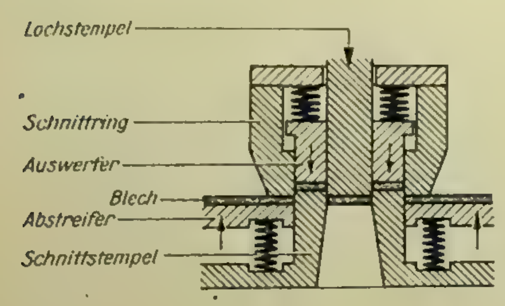


Abb. 8.3.1-3 *Gesamtschnitt*

mehrerer eingebauter Folge- und Gesamtschnitte. Solche Maschinen sind auch mit Beschneide- oder Abfalltrennscheren ausgerüstet. Die Werkzeuge können durch Biege- und Ziehwerkzeuge ergänzt und so zu Schneid- und Umformautomaten erweitert werden. Eine der vielen Sonderformen dient der Herstellung von Streckmetall, das durch Einschneiden und Strekken von Metallbändern hergestellt wird.

Thermisches Trennen. Beim thermischen Trennen wird der Werkstoff auf Entzündungstemperatur gebracht und aus der Trennfuge herausgeschleudert. Beim autogenen Trennen, dem Brennschneiden, geschieht das Erhitzen durch die Flamme eines Brenngas-Sauerstoff-Gemischs, beim elektrischen Trennen im Lichtbogen.

Beim *Brennschneiden* wird als Brenngas meist Äthin (Azetylen) mit einer Flammentemperatur von ≈ 3200 °C, seltener Wasserstoff, Stadtgas oder Benzin, z. B. für Unterwasserarbeiten, verwendet. Mit diesem Autogen-Verfahren lassen sich allgemein nur un- oder niedriglegierte Stähle bis 300 mm Dicke, bei Anwendung eines Starkschweißbrenners bis 600 mm, trennen. Ein Schneidbrenner unterscheidet sich von einem Schweißbrenner durch zusätzliche Zuführung von Sauerstoff. Nach der Bauform unterscheidet man *Zweidüsen-* und *Ringdüsenbrenner*. Der Zweidüsenbrenner schneidet nur in einer Richtung, weil der Werkstoff vor dem Trennen stets vorgewärmt werden muß und die Schneidsauerstoffdüse hinter der Heizdüse liegt. Beim Ringdüsenbrenner kann man die Schnittrichtung ändern, verbraucht jedoch mehr Sauerstoff. Durch eine weitere Ringdüse, die beispielsweise einen schützenden Luftmantel aufbaut, kann mit dem Ringbrenner auch unter Wasser geschnitten werden.

Brennschneidemaschinen werden zum Anlegen genauerer Schnitte und bei größeren Stückzahlen eingesetzt (Tafel 32). Sie besitzen mehrere (bis 100) Brenner, die maschinell oder von Hand geführt werden. Die Führung geschieht nach Anriß, über Schablonen, mittels Abtaststeuerung nach Zeichnungen oder durch Lochbandsteuerung (vgl. 8.9.2.).

Beim *Pulverschneidbrennen* wird meist ein Eisenpulver mit niedrigem Kohlenstoffgehalt in der Heizflamme auf Entzündungstemperatur gebracht und durch den Schneidsauerstoff in der Trennfuge verbrannt. Mit diesem Verfahren lassen sich Grauguß, hochlegierte Stähle und Buntmetalle trennen.

Das *Fugenhobeln* ist eine Sonderform des Brennschneidens, das zur Herstellung von Schweißnahtwurzeln und Beseitigung von Fehlerstellen dient. Der Fugenhobler wird mit einer maximalen Neigung von 30° über die Werkstückoberfläche geführt. Mit Drucksauerstoff kann eine Rille bis 12 mm Tiefe und 18 mm Breite aufgeschmolzen werden, wobei die Schlacke vom Brenner weggeblasen wird. Das *Sauerstoffhobeln* oder

Brennputzen wird zum Putzen von Guß-, Walz- und Schmiedestücken (vgl. 3.5.3.) eingesetzt.
Elektrisches Trennen. Die zum Trennen notwendige Temperatur liefert ein Lichtbogen, der zwischen dem Werkstück und einer beständigen Kohle- oder einer abschmelzenden Stahlelektrode gezündet wird. Auf diese Weise kann bei Verwendung lackierter Stahlelektroden auch unter Wasser elektrisch getrennt werden. Hohle Stahlelektroden, die mit Schlackebildnern ummantelt sind, werden beim *Oxyarc-Verfahren* oder *elektrischem Sauerstofftrennen* verwendet. Durch die Hohlelektroden wird zusätzlich Sauerstoff in die Lichtbogenflamme geblasen. Mit elektrischen Trennverfahren können auch Werkstoffe, wie Kupfer, Aluminium und Grauguß, getrennt werden, die sich autogen nicht oder nur schwer trennen lassen. Die größte Trenndicke liegt bei 100 mm.
Plasmaschneiden ermöglicht hohe Trenngeschwindigkeiten, da die Temperatur der erzeugten Plasmawolke bis 30000 °C ansteigen kann. Dies wird durch ein Inertgas erreicht, das im Lichtbogen zwischen einer Wolframelektrode und dem Werkstück strömt. Verwendet werden Argon, Stickstoff, Helium oder Gasgemische, wie Argon-Wasserstoff, Argon-Stickstoff oder Stickstoff-Wasserstoff. Es entstehen saubere und glatte Schnittflächen trotz Trenngeschwindigkeiten von 10 m/min, bei unlegiertem Kohlenstoffstahl sogar bis 100 m/min. Getrennt werden NE-Metalle, wie Aluminium- und Kupferlegierungen, Grauguß und rostfreie Stähle.

8.3.2. Spanen

Die Bearbeitung und Fertigstellung von Werkstücken in der Industrie erfolgt i. allg. durch eine spanende Formgebung, wobei mittels eines Schneidwerkzeugs vom Material des Werkstücks Späne abgehoben werden. Auch nach umformenden Prozessen folgen i. allg. noch ein oder mehrere Arbeitsgänge des Zerteilens, Spanens oder Abtragens. Beim Spanen erfolgt die Abtrennung der Späne auf mechanischem Wege durch die *Schneide* eines Werkzeugs. Nach der Form und Ausbildung der Werkzeugschneiden unterscheidet man 2 Arten der spanenden Formgebung:

– *Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide*, wobei das Werkzeug *einschneidig*, wie z. B. der Drehmeißel, oder *mehrschneidig*, wie z. B. der Spiralbohrer, sein kann;

– *Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide*, d. h. mit Werkzeugen, deren Schneidenformen zufällig, wechselhaft und unregelmäßig sind, z. B. Schleifkörper.

Zum Abtrennen eines Spans sind bestimmte Zuordnungen von Werkstück und -zeug notwendig. Eine keilförmige Schneide wird durch eine mechanische Kraft in Schnittrichtung in den

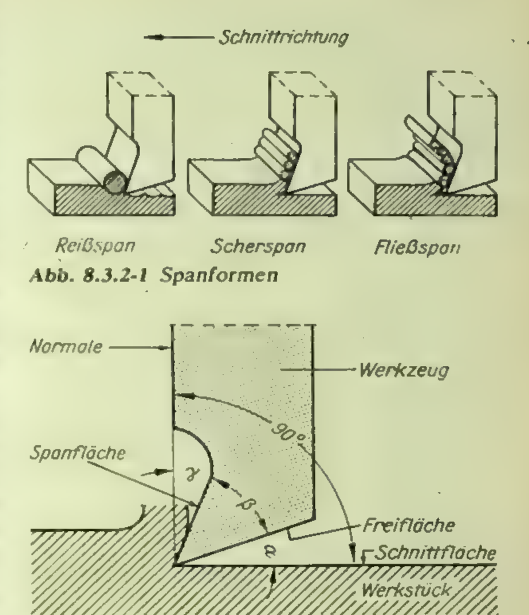


Abb. 8.3.2-1 Spanformen

Abb. 8.3.2-2 Winkel und Flächen an der Schneide

Werkstoff vorgetrieben. Dabei kommt es zunächst zu einer Stauchung des Werkstoffs vor der Schneide. Der gestauchte Werkstoff wird aufgebogen und schließlich von der Schneide abgehoben. In Abhängigkeit von bestimmten Gesetzmäßigkeiten der Spanbildung, wie Schneidenform, Trenngeschwindigkeit und Werkstoff, entstehen die in Abb. 8.3.2-1 gezeigten 3 Spanarten. Der *Reißspan* bildet eine Folge kurzer, bröckliger Werkstoffteilchen, der *Scherspan* verschweißt die bröckelnden Späne teilweise und der *Fließspan* bildet ein glatt ablaufendes Band fest zusammenhängender Spanelemente. Grundsätzlich ergeben spröde Werkstoffe kurze Späne, während zähe Materialien lange, fließende Späne bringen. Im allgemeinen gelten jene Spanformen als günstig, deren geometrische Gestalt eine hohe Schüttdichte ermöglichen, wie z. B. Spiralspanstücke. Die *Spanformen* unterteilen die 3 Spanarten in Band-, Wirr-, Schrauben-, Spiralspäne u. a.
Grundkriterien. *Winkel* und *Schneiden*. Voraussetzung für das Abtrennen eines Spans mit einem Schneidwerkzeug ist der Schneidkeil. Er ist in Abb. 8.3.2-2 mit Winkel β bezeichnet und wird in der Spanungslehre *Keilwinkel* genannt.
Je kleiner er gewählt wird, d. h. je spitzer der Keil wird, desto geringer ist die zum Spanen benötigte Kraft, aber auch die Widerstandsfähigkeit der Schneide. Mit wachsender Festigkeit der Werkstoffe muß daher der Keilwinkel größer

gewählt werden. Zusammen mit dem *Freiwinkel α* bildet er den *Spanwinkel γ*. Der Freiwinkel entsteht zwischen der Freifläche und der Schneidebene. Er dient nur der Verminderung der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück und kann deshalb klein sein. Der Spanwinkel ist damit hauptsächlich abhängig von der Wahl des Keilwinkels. Spanwinkel und Form der Spanfläche, über die der abgetrennte Span abläuft, beeinflussen maßgeblich Spanlänge und -fluß. Am Werkzeug werden somit Winkel und Flächen definiert, die erzeugbar und meßbar sind. Beim Spanungsvorgang treten *Wirkwinkel* auf, die durch den Spanungsvorgang geringe Abweichungen zu den betreffenden *Werkzeugwinkeln* aufweisen können. Neben der *Hauptschneide* können an Werkzeugen auch *Nebenschneiden* auftreten, die jedoch nicht oder nur wenig an der Spanungsarbeit beteiligt sind. Die Auswahl und Festlegung der Werkzeugwinkel für die einzelnen Werkzeuge und Verfahren erfolgt aufgrund empirischer und wissenschaftlicher Erkenntnisse.

Schnittbewegungen treten in Form der Hauptschnitt- bzw. Vorschubbewegung und in intermittierenden Bewegungen, wie der Zustellbewegung bzw. Schnittiefe, auf. Durch die Bewegung wird die Spanform bestimmt. Abb. 8.3.2-3 verdeutlicht die Verhältnisse beim Drehen. Der Spanungsquerschnitt wird durch die Schnittiefe und den Vorschub des Werkzeugs pro Umdrehung des Werkstücks gebildet. Die Hauptschnittbewegung entsteht durch die Rotation des Werkstücks. Der Spanungsquerschnitt ist allerdings nicht identisch mit dem abgehobenen Spanquerschnitt, weil der zu zerspanende Werkstoff bei der Spanbildung gestaucht wird.

Wie die Werkzeug- und Spanwirkwinkel sind auch die Schnittbewegungen in Standards definiert und weitgehend bezüglich ihres optimalen Wertes zur Lösung einer Fertigungsaufgabe erforscht. Als Schnittregime oder Spanungsrichtwerte dienen sie der Programmierung und Reproduktion der Spanungsbedingungen in der Industrie.

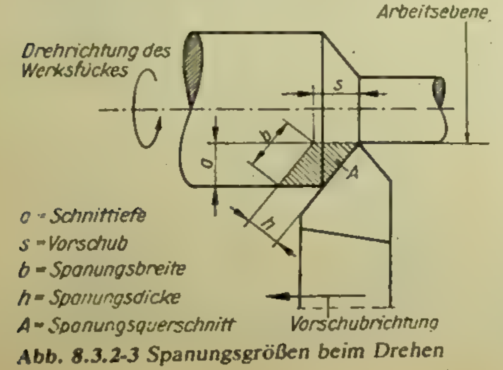


Abb. 8.3.2-3 *Spanungsgrößen beim Drehen*

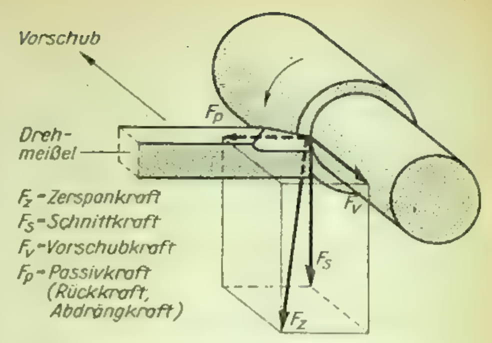


Abb. 8.3.2-4 *Schnittkräfte beim Drehen*

Die *Hauptschnittbewegung* ist die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die pro Umdrehung oder Hub einen Span abhebt. Diese Schnitt- oder Umfangsgeschwindigkeit (beim Schleifen) wird in m/min bzw. m/s angegeben.

Die *Vorschubbewegung* ist i. allg. senkrecht zur Schnittbewegung gerichtet und bewirkt die stetige Spanabnahme bei rotierender oder die wiederholte Spanabnahme bei geradliniger Schnittbewegung. Der Vorschubweg pro Umdrehung oder Arbeitshub bestimmt die Spandicke. Die Vorschubgeschwindigkeit in mm/min ist klein gegenüber der Schnittgeschwindigkeit.

Mit der *Zustellbewegung* in mm wird die die Spanbreite bestimmende Schnittiefe eingestellt.

Kräfte beim Spanen. Aus der Schnittbewegung ergibt sich die *Schnittkraft*, aus der Vorschubbewegung die *Vorschubkraft*. Addiert mit der Passiv- oder Rückkraft erhält man die *resultierende Zerspankraft* (Abb. 8.3.2-4). Bei bekannten Spanungsbedingungen sind die Spanungskräfte und die notwendigen Antriebsleistungen berechenbar. Da die Relativgeschwindigkeiten in die Berechnungsformeln eingehen, ergibt sich i. allg. ein hoher Leistungsbedarf für die Erzeugung der Schnittbewegung (Hauptantrieb) gegenüber niedriger Leistungen im Vorschubantrieb. Die spezifische Schnittkraft F_s, d. h. die notwendige Schnittkraft pro 1 mm^2 Spanungsquerschnitt, ist eine wichtige Werkstoffkenngröße.

Bearbeitungsgenauigkeit. Durch Variieren der Spanungsgrößen, Schnitt-, Vorschubgeschwindigkeit und Zustellbetrag, ergeben sich beim Drehen die in der Tab. 8.3.2-5 genannten Verfahrensvarianten und Oberflächenqualitäten

Tab. 8.3.2-5 *Rauhtiefen R_t beim Drehen*

Bearbeitungsart	µm
Schruppen	25 ... 100
Schlichten	10 ... 25
Feindrehen	2,5 ... 10
Feinstdrehen	1 ... 2,5

(Rauhtiefen R_t). Dabei orientiert das *Schruppdrehen* auf das schnelle Zerspanen großer Werkstoffmengen, während das *Fein-* oder *Feinstdrehen* bei geringem Werkstoffabtrag gute Oberflächenqualitäten sichert. Derartig extreme Forderungen führten zur Ausbildung spezieller Werkzeuge und Maschinen.

Standzeiten definieren die Gebrauchszeit eines Werkzeugs und geben an, wann das Werkzeug ausgewechselt werden muß. Hierfür können verschiedene Kriterien maßgebend sein, wie Überschreiten zulässiger Grenzen für die Bearbeitungskräfte oder Toleranzen des Werkstücks durch den *Werkzeugverschleiß*. Für geometrisch bestimmte Schneiden können Standzeiten berechnet bzw. für vorgegebene Standzeiten die Schnittregimes festgelegt werden. Dies ist besonders wichtig für Automaten, damit ein rechtzeitiger und wirtschaftlicher Werkzeugwechsel erfolgen kann. Bei Drehmeißeln sind Standzeiten von 60, 240 und 480 min üblich, denen jeweils werkstoffabhängig eine bestimmte Schnittgeschwindigkeit zugeordnet ist. Bei Schleifkörpern ist die Standzeit wesentlich geringer, deshalb muß ein Nachschärfen des Schleifkörpers durch *Abrichten* in der Maschine möglich sein.

Die Effektivität des Spanungsvorgangs wird neben den Eigenschaften des Werkstoffs, des Werkzeugs und der Werkzeugmaschine auch vom *Hilfsstoff* bestimmt, der zum Schmieren und Kühlen meist in flüssiger Form an die Spanungsstelle gebracht wird (vgl. 8.5.).

Arten der Spanabnahme. Die Art der Ausbildung des Werkzeugs und die Zuordnung der Bewegungen zu Werkstück oder Werkzeug bestimmen die Arten der Spanabnahme und damit Spanungsverfahren und Werkzeugmaschine. Für diese sind verschiedene Einteilungen oder Ordnungsschemata bekannt. In Abb. 8.3.2-6 erfolgt eine Zuordnung rotierender oder gerader Schnittbewegungen zu den Verfahren. Weitere theoretisch mögliche Kombinationen sind zu aufwendig für die Realisierung oder es besteht hierfür kein Bedarf. Bevorzugter Bewegungsträger ist das Werkzeug. Es können auch Bewegungen in der Form des Werkzeugs gespeichert sein, wie z. B. die Zustellung im Bohrerdurchmesser.

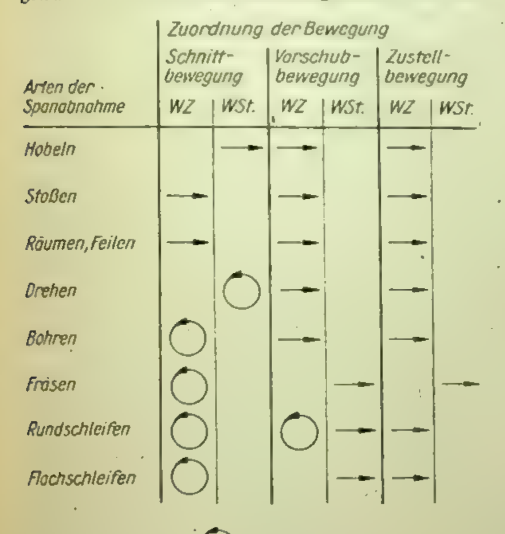


Abb. 8.3.2-6 *Entstehung der Spanungsarten durch Zuordnung der Schnittbewegungen*

Schneidwerkstoffe müssen härter sein als der zu trennende Werkstoff. Deshalb werden gehärtete oder naturharte Werkstoffe verwendet. Die Härte bestimmt im wesentlichen die erreichbaren Schnittgeschwindigkeiten und Standzeiten.

Werkzeugstähle (WS) enthalten ≈ 0,7 bis 1,3 % Kohlenstoff. Ihr Einsatzgebiet beschränkt sich im wesentlichen auf niedrige Geschwindigkeiten und Schneidentemperaturen bis 300 °C.

Schnellarbeitsstähle (SS, HSS) sind hochlegierte Werkzeugstähle, die bis ≈ 600 °C einsetzbar sind. Legierungsmetalle sind Wolfram, Molybdän, Chrom, Vanadin und Kobalt, die die Warm-, Verschleiß- und Biegefestigkeit verbessern.

Sinterhartmetalle (HM) werden im wesentlichen durch ein Gerüst von Wolfram- oder Titankarbiden gebildet, das mit metallischem Kobalt oder Nickel gefüllt ist. Sie ermöglichen noch bei 1000 °C eine ausreichende Schneidfähigkeit. Durch weitere Legierungsbestandteile können sie spezifischen Spanungsaufgaben angepaßt werden.

Oxidkeramische Schneidstoffe, auch Schneidkeramik genannt, bestehen aus Aluminiumoxid (Al_2O_3). Dieser Werkstoff hat eine sehr hohe Härte und Wärmebeständigkeit. Durch den niedrigeren Reibkoeffizienten zum metallischen Werkstück ergeben sich niedrigere Schnittkräfte und -temperaturen. Sehr hohe Schnittgeschwindigkeiten sind zulässig. Schneidkeramik ist empfindlich gegen Schlagbeanspruchung und Temperaturwechsel. Die 3 Grundarten sind oxidische Keramik (Kawenit S [M]), Oxid-Metall-Keramik (Cermet, vgl. 6.2.4.) und Oxid-Karbid-Keramik (Harthü HC 20 M).

Diamantwerkzeuge nutzen natürliche oder künstliche Diamanten als Schneidstoffe, da sie die härtesten bekannten Werkstoffe darstellen. Sie sind beispielsweise fünfmal härter als Hartmetall und besonders geeignet für die Feinbearbeitung auch von NE-Metallen und Plasten. Sie sind stoßempfindlich und verbrennen bei ≈ 870 °C.

Günstigere thermische Beständigkeit wird mit den nur geringfügig weicheren Bornitriden erreicht, die unter den Bezeichnungen „Elbór“ (UdSSR) oder „Borazon“ (USA) handelsüblich sind.

Die Auswahl der Werkzeuge, die Festlegung der Schnittbedingungen und die zu erwartenden Ergebnisse hinsichtlich Qualität und Standzeit werden durch Tabellen, Richtlinien und Werkstandards geregelt.

Werkzeugmaschinen. Die Werkzeugmaschine verbindet Werkstück und Werkzeug und ist mit den notwendigen Funktionen zur spanenden Bearbeitung des Werkstücks ausgerüstet, wie Träger- und Gestellbauteile, Arbeitstische und -spindeln, Antriebe und Steuerungen. Die Ausbildung ihrer Baugruppen und deren Zuordnung zur Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug werden durch das Spanungsverfahren, wie Drehen oder Hobeln, festgelegt, wobei die Hauptschnittbewegung das bestimmende Element ist.

Gestellbauteile oder Trägerelemente von Werkzeugmaschinen, wie Betten, Ständer, Querausleger, Tische und Getriebekästen, bestehen aus Grauguß. Sondermaschinen sowie Scherengestelle werden häufig als Stahlschweißkonstruktionen ausgeführt.

Führungen ermöglichen die Bewegung der Baugruppen und sind meist als Gleitführungen, bei kurzen Führungen auch als Wälzführungen, angelegt. Besonders Gleitführungen müssen gut geschmiert werden (hydrodynamische oder seltener hydrostatische Führungen). Zur Verschleißminderung werden legierter oder härtbarer Grauguß bzw. Führungsleisten aus gehärtetem Stahl eingesetzt.

Hauptspindeln sind mit den Führungen maßgeblich für die Qualität verantwortlich und werden deshalb in Präzisionslagern aufgenommen. Verwendet werden hydrodynamische oder auch hydrostatische Mehrflächengleitlager (vgl. 9.1.4.) und in zunehmendem Maße auch Präzisionswälzlager. Im allgemeinen hat eine Werkzeugmaschine nur eine Hauptspindel. Es gibt jedoch auch hochproduktive *mehrspindlige* Werkzeugmaschinen, z. B. Mehrspindel-Drehautomaten.

Der *Antrieb* der Arbeitsschlitten und -spindeln erfolgt jeweils über einen Elektromotor, bei zugeordneten Antrieben, wie Vorschubgetrieben mit der Angabe „mm/Umdrehung", durch Abzweig vom Hauptantrieb. Zur besseren Anpassung an die günstigsten Arbeitsgeschwindigkeiten und zur Drehmomentenwandlung sind Getriebe zwischengeschaltet (vgl. 9.1.7.). Meist werden Zahnradgetriebe mit geometrischem Stufensprung eingesetzt, jedoch werden auch stufenlose mechanische oder elektrische Drehmomentenwandler angewendet. Auch hydraulische Antriebe (vgl. 9.2.2.) werden verwendet, beispielsweise für Tischantriebe.

Schrittmotore werden insbesondere in leistungsschwachen Antrieben, wie Zustell- oder Vorschubantrieben, eingesetzt. Sie erlauben Bewegungen in Drehimpulsen von wenigen Grad bis zu mehreren tausend Umdrehungen pro Minute. Die rotatorischen Antriebsbewegungen werden nach Bedarf durch Spindeln und Spindelmuttern in geradlinige Bewegungen umgewandelt. Zur Verbesserung des Wirkungsgrads werden teilweise *Kugelrollspindeln* eingesetzt.

Steuerungen ermöglichen die Bedienbarkeit der Maschine und den Bewegungs- und Programmablauf. Die Steuerung besteht aus 2 Teilen: dem Starkstromteil, der den Anschluß der Maschine an das Netz und das Schalten der Antriebe ermöglicht, und dem Logikteil, der die gewünschte Zuordnung und Reihenfolge der Bewegungen und Vorgänge gewährleistet. Aus dem klassischen Maschinenbau sind auch Maschinen bekannt, die, wie z. B. Mehrspindel-Drehautomaten, mit mechanischen Programmträgern in Form von Hilfssteuerwellen mit Programmkurven arbeiten. Ihr Hauptnachteil liegt in der längeren Umrüstzeit auf ein anderes Werkstück.

Numerische Steuerungen (*NC*, numerical control) gestatteten die rationelle automatische Bearbeitung von Werkstücken auch bei geringen Stückzahlen (vgl. 8.9.2., 14.3.7.).

NC-Maschinen sind aufwendig in Steuerung und Antrieben. Deshalb finden sie vorzugsweise in größeren Werkzeugmaschinen, z. B. Bohrwerken, Anwendung. Sie sind oftmals gekoppelt mit einem Rechner, der eine NC-Maschine oder ein ganzes System von NC-Maschinen kontrolliert und steuert.

AC-Steuerungen (adaptiv control) oder Auslastungssteuerungen befassen sich mit der Optimierung des Spanprozesses selbst. So kann beispielsweise über ein Meßglied kontrolliert werden, ob die Antriebsleistung der Hauptspindel den vorgeschriebenen Wert erreicht, wobei durch Regelung der Zustellgeschwindigkeit Abweichungen vom Sollwert korrigiert werden.

Durch *Zubehör* werden die Gebrauchseigenschaften der Werkzeugmaschinen erweitert. Werkstückgebundene Einrichtungen dienen der Spezialisierung und Universalausführungen der Erweiterung des Arbeitsbereichs. Weiteres Zubehör, wie Hilfsstoffaggregate mit Pumpen, Filtern und Armaturen, dient einer günstigen Prozeßgestaltung.

Hobeln und Stoßen. Hobel- und Stoßmaschinen erzeugen ebene Flächen an allgemein prismatischen Werkstückformen. Hierzu müssen Hauptschnitt- und Vorschubbewegung in einer Ebene liegen. Die Zustellung erfolgt senkrecht hierzu. Hobeln und Stoßen unterscheiden sich in der Zuordnung der Hauptschnittbewegung. Beim *Stoßen* bewegt sich ein Stößel, der das Werkzeug, den Hobelstahl, trägt, beim *Hobeln* bewegt sich der Maschinentisch mit dem aufgespannten Werkstück. Hobelmaschinen gehören zu den größten und schwersten Werkzeugmaschinen.

Stoßmaschinen, veraltete Bezeichnung *Shaping-Maschinen*, bewegen über ein Getriebe den Arbeitsstößel, der den Werkzeughalter trägt. Der

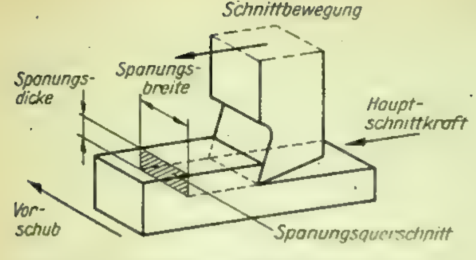


Abb. 8.3.2-7 Spanungsgrößen beim Stoßen

Werkzeughalter ist schwenkbar und hat einen Schlitten für die Zustellung des Werkzeugs. Als Getriebe wird häufig ein Kurbelgetriebe eingesetzt, dessen kinematischer Bewegungsablauf durch die gedämpfte Bewegungsumkehr, den Eilrücklauf und die fast konstante Arbeitsgeschwindigkeit beim Vorlauf günstig für die Prozeßführung ist. Die Hublänge ist über das Getriebe, die Geschwindigkeit durch Variieren der Antriebsdrehzahl der Kurbel über ein Zahnradschaltgetriebe einstellbar. Das Werkstück ist auf einem Arbeitstisch festgespannt, der den Quervorschub pro Stößelhub ausführt. Die Spanbildung zeigt Abb. 8.3.2-7. Als Stößelantrieb werden auch hydraulische Antriebe angewendet (vgl. 9.2.), besonders bei der größeren senkrechten Bauform. Die Zustellung erfolgt von Hand oder automatisch, sie kann auch zum Ausstoßen bestimmter Formen entsprechend gesteuert werden. Zur Schonung der Schneide wird das Werkzeug beim Stößelrückzug automatisch abgehoben.

Zahnradstoßmaschinen arbeiten mit einem Formstahl oder Stoßrad und werden besonders für Kegelräder und Innenverzahnungen eingesetzt. Die Arbeitsproduktivität ist zwar geringer als beim Wälzfräsen von Zahnrädern, gestoßene Zahnräder haben jedoch geringere Maß- und Formfehler als gefräste. Die Zahnform entsteht durch eine Abwälzbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück.

Hobelmaschinen haben feststehende Werkzeuge und führen die Hauptschnittbewegung mit dem Tisch und damit dem Werkstück aus. Es sind Großbearbeitungsmaschinen. Sie werden aus einem *Baukasten* von Maschinenbaugruppen aufgebaut. So können an einen Arbeitstisch ein Ständer mit einem Ausleger und einem Arbeitssupport (Abb. 8.3.2-8) angebaut werden oder rechts und links je ein Ständer, die durch den Ausleger und ein Verbindungsstück zu einem Portal hoher Steife und Belastbarkeit verbunden werden. Wahlweise können weitere Supporte am Ausleger oder seitlich am Ständer angebracht werden. Der Tisch trägt das oft tonnenschwere Werkstück. Um die effektiv notwendigen Arbeits- und Rücklaufgeschwindigkeiten zu erreichen, sind kräftige Antriebe notwendig. Häufig findet man direkt umsteuerbare hydraulische oder elektrische Antriebe. Bei mechanischen Antrieben ist die Bewegungsumkehr durch eine leistungsstarke Kupplung gelöst. Zustellung und Vorschub erfolgen durch die Supporte. Zur besseren Ausnutzung dieser großen Maschinen und Antriebsleistungen können gleichzeitig mehrere Werkzeuge im Eingriff sein oder zusätzliche Fräs- und Schleifsupporte angebracht werden.

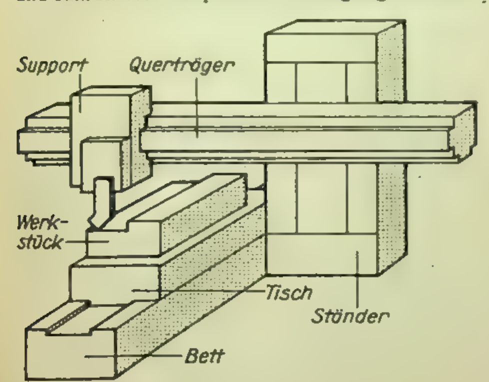


Abb. 8.3.2-8 Einständerhobelmaschine

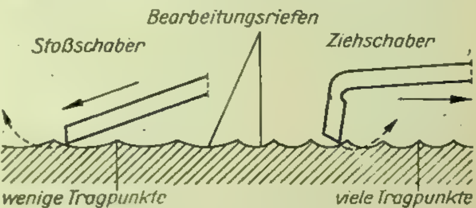


Abb. 8.3.2-9 Bewegungen beim Flachschaben

Schaben. Mit einem *Schaber* werden an gehobelten, gefrästen o. a. maschinell bearbeiteten Flächen kleinste Unebenheiten abgetragen. Dabei wird der Schaber von Hand unter einem großen Schnittwinkel (Abb. 8.3.2-9) stoßend oder ziehend geführt. Die Oberflächengüte wird durch *Tuschieren* geprüft. Hierzu wird eine ebene Tuschierplatte mit einer Tuschierpaste dünn bestrichen, auf das Werkstück gelegt und reibend gegeneinander verschoben. Dabei markieren sich die Erhebungen als blanke, tragende Punkte, die anschließend weggeschabt werden. Durch mehrmaliges Wiederholen dieses Vorgangs entsteht eine glatte, ebene und an vielen Punkten tragende Fläche hoher Genauigkeit. Die Bewertung erfolgt nach der Anzahl der tragenden Punkte pro Quadratzoll, z. B. 20 für Werkzeugmaschinenführungen.

Für das Schaben von weichen Zahnrädern wurde eine Schabemaschine entwickelt, deren Werkzeug, das *Schaberad*, wie ein Zahnrad geformt ist, auf den Flanken jedoch regelmäßig angeordnete kleine Schneiden enthält. Zum Schaben müssen die Zahnräder noch ungehärtet sein.

Feilen. Weniger genaue und feine Oberflächen als mit dem Schaben, aber wesentlich höhere Abtragsleistungen lassen sich durch Feilen erzielen. Als Werkzeug dient die *Feile*, die es in verschiedenen Querschnittsformen (Abb. 8.3.2-10) und Abmessungen gibt. Damit lassen sich nahezu beliebige Oberflächenformen bearbeiten. Die erreichbare Genauigkeit wird mit ≈ 0,03 mm angegeben. Die Schneidkeile an der Feile werden durch Fräsen oder durch *Einhauen* erzeugt. Gefräste Feilen haben gleichmäßige Schneidflächen, gehauene ungleiche mit negativem Spanwinkel (Abb. 8.3.2-11). Nach der Art des Hubs ergeben sich gleiche oder ungleiche Schneidenanordnungen. Die gehauenen Feilen wirken mit ihren negativen Spanwinkeln mehr schabend und glättend, während die gefrästen Feilen mit den schlankeren Schneidkeilen bessere Spanleistungen bringen und besonders für weiche Werkstoffe, wie Leichtmetalle, Kupfer und Messing, gut geeignet sind. Grob geteilte Feilen werden als *Schruppfeilen* zur Vorbearbeitung benutzt, während die *Schlichtfeilen* feingeteilte Verzahnungen aufweisen und für die Endbearbeitung eingesetzt werden. Schnittbewegung, Vorschub und Zustellung erfolgen beim Feilen von Hand durch das Werkzeug.

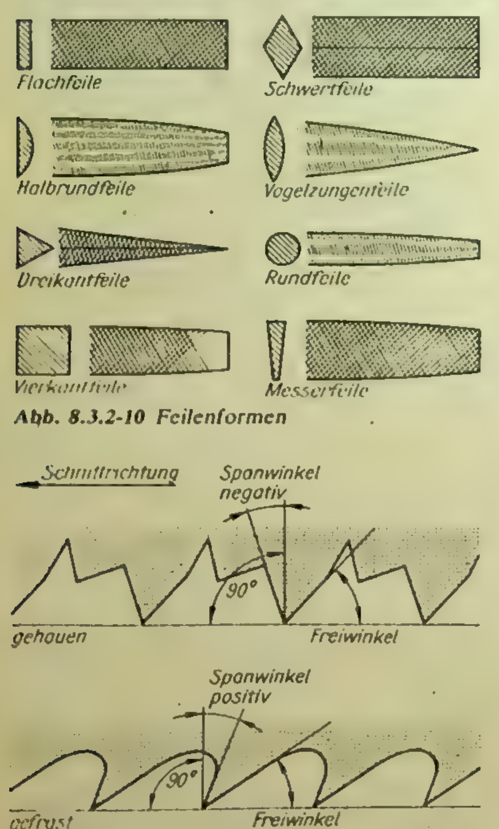


Abb. 8.3.2-10 Feilenformen

Abb. 8.3.2-11 Feilenzahnformen

Feilmaschinen werden im Schnitte- und Werkzeugbau eingesetzt, wobei die Feile maschinell angetrieben wird und die Schnittbewegung ausführt. Das Werkstück liegt meist auf einem Tisch, auf dem es von Hand zur Erteilung der Vorschub- und Zustellbewegung verschoben wird. Solche Feilmaschinen haben eine hin- und hergehende Bewegung für Werkzeuge, die in der Form den Handfeilen entsprechen, umlaufende Antriebe für kettenartig verbundene Feilkörper (*Bandfeilen*) oder für scheibenförmige Werkzeuge (*Feilscheiben*). Trotz fortschreitender Mechanisierung und genauerer Fertigungsmethoden bleibt das Feilen ein wichtiger Bearbeitungsvorgang.

Räumen. Mit dem Räumen können bestimmte vorgearbeitete Innen- oder auch Außenprofile endbearbeitet oder nachprofiliert werden, wie z. B. das Einarbeiten eines Keilwellenprofils in die zylindrische Bohrung eines Zahnrads. Es sind einfache und auch komplizierte Profile herstellbar. Das dazu notwendige Werkzeug wird *Räumnadel* genannt. Die Räumnadel trägt scheibenförmige Schneidteile, die die Querschnittsform des herzustellenden Profils aufweisen. Die jeweils folgende Schneidscheibe ist um einen bestimmten Betrag radial größer gehalten. Dadurch ergibt sich eine Stufung, die beim Durchzug der Räumnadel durch die Werkstückbohrung wie eine Vorschubbewegung wirkt. Die Räummaschine hat deshalb nur eine geradlinige Schnittbewegung durchzuführen. Sie beträgt ≈ 1 bis 15 m/min je nach bearbeitetem Material und Aufmaß, das 5 bis 12 mm/Hub, d. h. pro Räumwerkzeug, nicht überschreiten soll. Bei größeren Aufmaßen sind mehrere Werkzeuge nacheinander einzusetzen. Der letzte Abschnitt der Räumnadel trägt Schneidscheiben ohne Tiefenstaffelung. Sie dienen zum Kalibrieren des geräumten Profils. Somit können hohe Oberflächengüten mit Rauhtiefen von 0,5 bis 10 μm und Toleranzen bis IT 6 erreicht werden. Räumwerkzeuge sind sehr teuer in Anschaffung und Wartung. Ihr ökonomischer Einsatz ist deshalb von größeren Werkstückzahlen abhängig. Durch geeignete Kühl- und Schmiermittel und optimale Schnittgeschwindigkeit ist deshalb auch ein Maximum der Standzeit anzustreben. An das Werkstück sind bestimmte Bedingungen zu richten, z. B. gleichmäßige und ausreichende Wanddicken zur Aufnahme der Schnittkräfte und weicher, durch Grobglühen oder Vergüten egalisierter Werkstoff. Zur Erzeugung der Schnittbewegung wird wegen des sanften Anschnitts meist ein hydraulischer Antrieb für den Werkzeugträger in Räummaschinen eingesetzt (Abb. 8.3.2-12). Dabei wird die Räumnadel durch das am Tisch anliegende Werkstück gezogen. Kurze, knicksteifere Räumnadeln können auch durch das Werkstück gestoßen werden. Wegen der Länge der Räum-

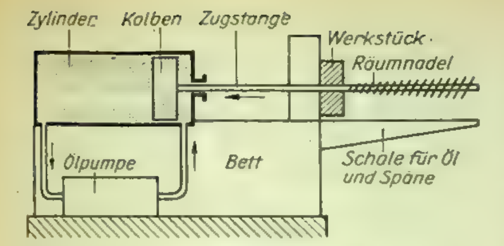


Abb. 8.3.2-12 Waagerecht-Räummaschine

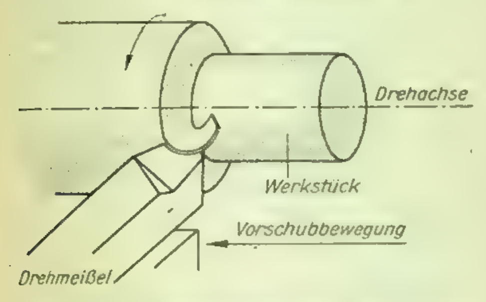


Abb. 8.3.2-13 Spanabnahme beim Längsdrehen

nadeln werden vorzugsweise Maschinen in waagerechter Ausführung gebaut.
Nutenziehmaschinen sind Sonderformen der Räummaschine zur Herstellung der häufig verwendeten Nuten in Bohrungen von Maschinenelementen.

Drehen. Beim Drehen erfolgt die Hauptschnittbewegung durch die Drehbewegung des Werkstücks. Das Werkzeug befindet sich auf einem Schlitten und führt die Zustell- und Vorschubbewegung aus. Dadurch entstehen zu ihrer Drehachse rotationssymmetrische Werkstücke mit zylindrischen Oberflächen und Kreisquerschnitt (Abb. 8.3.2-13). Im Normalfall wird das *Drehmeißel* oder *-stahl* genannte Werkzeug parallel zur Drehachse geführt (*Langdrehen*).
Erfolgt der Vorschub senkrecht zur Drehachse, so entsteht eine Planfläche und der Vorgang wird als *Plandrehen* bezeichnet. Wird mit einem Formstahl dieser Vorgang nur bis zu einer gewünschten Tiefe geführt, wird vom *Einstechdrehen* gesprochen. Das *Abstechen* ähnelt dem Einstechdrehen, wobei der Einstich bis zur Drehachse erfolgt und damit das freie Werkstückende abfällt.
Gewindeschneiden ist eine Sonderform dieser Dreharten, wobei ein dem Gewindeprofil entsprechender Formstahl im Langdrehverfahren und ein genau definierter Vorschub pro Umdrehung zur Erzeugung der gewünschten Gewindesteigung verwendet werden. Weiter lassen sich durch abhängige, zeitlich koordinierte Bewegungen in Vorschub- und Zustellrichtung nahezu beliebige Formen, z. B. auch Kegel- und Kugelflächen, erzeugen. Selbst der Kreisquerschnitt des rotationssymmetrischen Werkstücks kann durch einen gesteuerten Radialvorschub des Werkzeugs, der vom Drehwinkel des Werkstücks abhängig ist, z. B. in einen polygonförmigen Querschnitt umgewandelt werden (Unrund-, Mehrkant-, Hinterdrehen). Entsprechend der vielfältigen Bearbeitungsmöglichkeiten gibt es eine große Anzahl standardisierter Drehmeißel, die entweder ganz aus Schneidwerkstoff oder aber meist aus einem Schaftmaterial aus Baustahl mit einem darauf gelöteten, geklebten, geschweißten oder geklemmten Plättchen aus Schneidwerkstoff, vorzugsweise Hartmetall, bestehen. Schneidkeramik und Hartmetall werden auch als *Wendeplatten* geliefert, die in Klemmhaltern (Abb. 8.3.2-14) befestigt werden und entsprechend der Kantenzahl nach Abstumpfen mehrmals gewendet werden können. Verbrauchte Drehstähle werden auf beson-

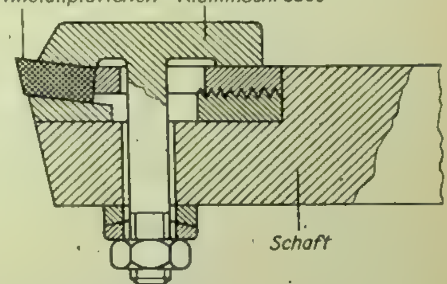
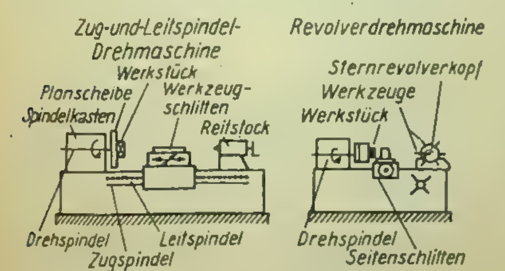


Abb. 8.3.2-14 Drehmeißel mit aufgeklemmten Hartmetallplättchen



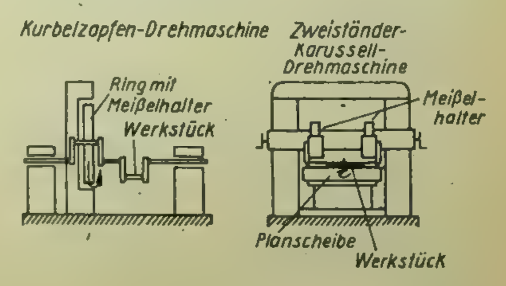


Abb. 8.3.2-15 Drehmaschinenbauarten

deren Instandsetzungsmaschinen, den *Stähleschleifmaschinen*, nach genau vorgegebener Geometrie für die Winkel und Flächen wieder scharf geschliffen. Die standardisierte Schneidengeometrie und ihre Reproduktion bilden die Voraussetzung für die Anwendung der in großem Umfang erarbeiteten Richtwerte und Arbeitstabellen für das Drehen.

Drehmaschinen. Entsprechend der Vielzahl von Dreharten gibt es auch eine Vielzahl verschiedener *Drehmaschinentypen*, wie Lang-, Plan-, Polygon- und Hinterdrehmaschinen, Kurbelwellen- und Nockenwellendrehmaschinen, nach ihrer Bauart oder Automatisierungsform auch Karussell-, Revolver- oder Mehrspindeldrehmaschinen. In Abb. 8.3.2-15 sind einige der genannten Typen schematisiert.

Die *Spitzendrehmaschine* oder *Leit- und Zugspindeldrehmaschine* ist die Grundform der Drehmaschinen. Von ihr leiten sich die anderen Typen ab. Trägerteil ist das *Bett*, das bei alten Konstruktionen oder leichten Typen mit Füßen versehen ist und bankförmig aussieht, woraus die Bezeichnung *Drehbank* resultiert, eine heute nur noch für leichte Mechaniker- oder Holzbearbeitungsmaschinen (Drechselbank) anwendbare Bauform. In Bett und Spindelkasten ist der Hauptantrieb untergebracht, der über ein Zahnradschaltgetriebe die Haupt- oder Drehspindel antreibt. Zur Verminderung von Schwingungen hat die letzte Getriebestufe bei höheren Drehzahlen eine Riemenübersetzung. Die *Spindel* trägt einen Innenkegel und einen Aufnahmeflansch für den Werkstückspanner, z. B. *Drehfutter*, *Planscheibe* oder *Körnerspitze*. Der *Reitstock* ist auf der Bettführung längs verstellbar angebracht und besitzt eine verschiebbare Pinole, in deren Konus die 2. Körnerspitze aufgenommen wird. Zwischen diesen Spitzen, die der Maschine den Namen geben, wird das mit den entsprechenden Zentrierbohrungen versehene Werkstück aufgenommen. Durch *Spannherz* und *Mitnehmer* erfolgt die Drehmomentenübertragung und damit der Antrieb auf das Werkstück. Zwischen Spindelkasten und Reitstock gleitet der Bettschlitten, der einen Kreuzsupport für den Drehmeißelhalter trägt. Der Antrieb für den Bettschlitten und den Support wird vom Hauptgetriebe über die *Zug-* oder *Leitspindel* abgeleitet. Die Leitspindel besitzt hierfür ein genau geschnittenes Trapezgewinde, dessen Steigung als Normal für das Drehen von Gewinden am Werkstück dient. Die Zugspindel hat nur eine Nut mit Nutenstein zur Drehmomentenübertragung. Zwischen Hauptgetriebe und Zug- bzw. Leitspindel befindet sich ein Untersetzungsgetriebe, mit dem über einen Satz von *Wechselrädern* feingestufte Vorschübe eingestellt werden können. Weitere Einrichtungen, wie *Setzstöcke* zur Abstützung dünner Werkstücke, *Spannzangen* für kleine Teile oder Arbeiten von der Stange, *Planscheiben* für große, sperrige Teile oder Zusatzeinrichtungen zum Nachformen oder Glattwalzen, erhöhen das Einsatzgebiet dieser universalen Drehmaschine.

Revolverdrehmaschinen und *Drehautomaten* gehören zu den automatisierten Drehmaschinen. Bei Revolverdrehmaschinen ist in einem schaltbaren Magazin, dem *Revolver*, das benötigte Werkzeugsortiment gespeichert und wird durch Weiterschalten des Revolvers programmgemäß zum Einsatz gebracht. Revolver mit waagerechter Drehachse bzw. stirnseitig angebrachten Werkzeugen werden *Trommelrevolver* genannt, solche mit am Umfang befestigten Werkzeugen *Sternrevolver*. *Mehrspindelautomaten* besitzen zusätzlich mehrere (4 bis 8) Hauptspindeln. Derartige Maschinen können effektiv nur in der Massenfertigung eingesetzt werden (vgl. 8.9.2.). Weitere spezialisierte Drehautomaten sind *Langdrehautomaten* für kleine, schlanke Teile, wie Uhrenachsen, oder *Schraubenautomaten* für die Fertigung von Schrauben, Stiften u. a.

Kopf- oder *Plandrehmaschinen* besitzen Planscheiben bis zu mehreren Metern Durchmesser. Solche großen Maschinen haben anstelle eines Betts nur eine gemeinsame Grundplatte. Spindelstock und Drehsupport haben eigene Ständer und Antriebe, oft elektrisch synchronisiert und zur Konstanthaltung der Drehgeschwindigkeit beim Planen mit elektrischer Schnittgeschwindigkeitssteuerung versehen. Für schwere Werkstücke wird die Planscheibe waagerecht mit senkrechter Achse gelegt. Die Supporte werden an einem oder an zwei zu einem Portal verbundenen Seitenständern geführt. Solche *Karuselldrehmaschinen* (vgl. Abb. 8.3.2-15, Tafel 31) wurden bereits bis 25 m Drehdurchmesser gebaut. Weitere spezielle Bauformen sind Drehmaschinen für die Kurbelwellen- und Nockenwellenbearbeitung im Motorenbau

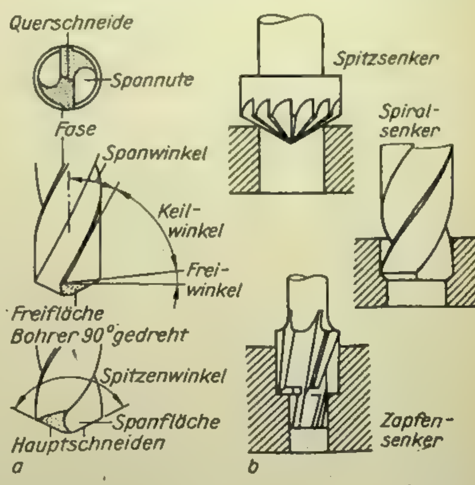


Abb. 8.3.2-16 ***a*** *Spiralbohrer und* ***b*** *Senkerarten*

und schwere Spitzendrehmaschinen für die Bearbeitung tonnenschwerer Walzen für Walzwerkstraßen. In zunehmendem Maße werden Spitzen- und Futterdrehmaschinen mit numerischer Steuerung (vgl. 8.9.2.) eingesetzt. Sie sind in der Lage, die Lücke zwischen Universaldrehmaschine für die Einzelfertigung und Drehautomat für die Massenfertigung zu schließen.
Weitere Bauarten sind die *Kopier-* und die *Hinterdrehmaschinen.* Bei den Kopierdrehmaschinen wird im Langdrehverfahren der Drehmeißel nicht parallel zur Drehachse geführt, sondern in einer bestimmten Kurve, die durch eine Schablone oder ein Musterwerkstück vorgegeben werden kann. Das Abtast- und Übertragungssystem arbeitet hydraulisch oder elektrohydraulisch. Die Hinterdrehmaschine wird zur Drehbearbeitung von radial abgesetzten Werkstücken benötigt. Hierzu führt der Drehmeißel eine abhängig vom Drehwinkel des Werkstücks gesteuerte radiale Hubbewegung aus, die in Tiefe und Hubwinkel wählbar ist.
Bohren, Senken, Reiben, Gewindeschneiden. Das *Bohren* von zylindrischen Löchern erfolgt mittels Bohrwerkzeugen, deren bekannteste Form der *Spiralbohrer* ist (Abb. 8.3.2-16a). Seine beiden wendelförmigen Hauptschneiden zerspanen den Werkstoff. Spannuten zwischen den Schneiden ermöglichen das Abwandern der Bohrspäne. Die spiraligen Fasen auf der Mantelfläche dienen der Führung des Bohrers und reduzieren die Reibfläche. Eine spanungsmäßig ungünstige Stelle bildet die Querschneide, die auf den Bohrungsgrund drückt und die Vorschubkräfte erhöht. Der Bohrungsdurchmesser wird durch den Durchmesser des verwendeten Spiralbohrers, gemessen über die Fasen, bestimmt. Bohrmaschinen haben deshalb keine Zustellbewegung. Zum Ausbohren vorgearbeiteter großer Löcher werden *Bohrstangen* benutzt, die mit Bohrmeißeln besetzt sind und auch mit radialer Zustellung der Bohrmeißel versehen sein können. *Tieflochbohrer* werden zum Bohren sehr tiefer Löcher verwendet. Sie benötigen Spezialwerkzeuge und spülen die Späne durch einen Hohlraum im Inneren der Werkzeuge durch den Kühlmitteldruck nach außen. Ihr Schneidkopf ist ein- oder mehrschneidig ausgeführt.
Senken. Beim *Aufsenken* werden vorhandene Bohrungen mit dem *Spiralsenker* erweitert. Zum *Einsenken* zylindrischer Schraubenköpfe werden *Zapfensenker*, für konische Köpfe und zum *Entgraten Spitzsenker* verwendet (Abb. 8.3.2-16b).
Reiben. Durch das Herausschaben feinster Späne aus Bohrungen werden deren Oberflächen geglättet. Als Werkzeug wird dazu die *zylindrische Reibahle* verwendet. Sie hat mehrere achsparallele Schneiden, die zur Vermeidung von Rattererscheinungen in unterschiedlichen Abständen angebracht sind. Neben den zylindrischen Reibahlen gibt es *Kegelreibahlen* zum Reiben konischer Bohrungen. *Maschinenreibahlen* können teilweise radial verstellbar ausgeführt sein.

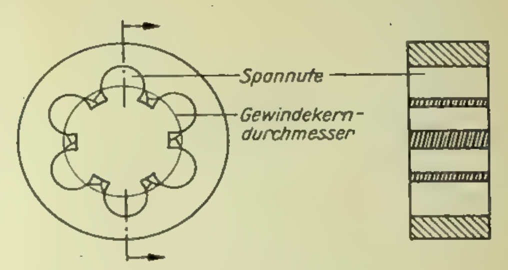


***Abb. 8.3.2-17** Schneideisen*

Gewindeschneiden. *Gewindebohrer* und *Schneideisen* ermöglichen die Herstellung von Innen- oder Außengewinde. Hierzu wird keine Leitspindel wie bei der Drehmaschine benötigt, da die Werkzeuge bereits die entsprechende Gewindesteigung enthalten. Innengewinde werden mittels Gewindebohrer geschnitten. Zur Schonung des Werkzeugs werden meist 3 Gewindebohrer als *Vor-*, *Mittel-* und *Fertigschneider*, die sich in Anschnitt und Gewindeausbildung unterscheiden, nacheinander eingesetzt. Der Fertigschneider arbeitet das endgültige Gewindeprofil heraus. Da das Gewinde bereits vorgearbeitet ist, genügt ein kurzer Anschnitt, und das Gewinde kann bis fast auf den Bohrungsgrund geschnitten werden. *Einzelschneider* schneiden Gewinde in einem Durchgang und haben deshalb einen langen Anschnitt, der den Vor- und Mittelschneider ersetzen muß. Er eignet sich nur für Durchgangslöcher. Das Außengewinde wird durch *Schneideisen* (Abb. 8.3.2-17) in einem Durchlauf fertiggeschnitten.
Für die Massenherstellung werden selbstöffnende *Gewindeschneidköpfe* mit auswechselbaren Schneidbacken verwendet. Dabei entfällt das sonst notwendige Zurückdrehen des Werkzeugs aus dem gefertigten Gewinde.
Bohrmaschinen nehmen außer Bohrern auch die Werkzeuge für das Senken, Reiben und Gewindeschneiden auf. Die Grundform ist die *Säulen-* oder *Kastenständerbohrmaschine.* Auf einer Grundplatte befindet sich ein Ständer, der den höhenverstellbaren Spindelkasten trägt. An der Säule oder direkt auf der Grundplatte befindet sich ein Maschinentisch, auf den das Werkstück gespannt wird. Der Antrieb und das Untersetzungsgetriebe für die Bohrspindelumdrehung und den Vorschub der Pinole befinden sich im Spindelkasten. In der Pinole wird in einem Aufnahmekonus das Werkzeug oder ein Spannfutter, das *Bohrfutter* (vgl. 8.6.2.), aufgenommen. Mehrere Ständerbohrmaschinen in Reihenanordnung mit gemeinsamem Tisch ermöglichen unterschiedliche Bohrarbeiten durch Weiterleitung

des Werkstücks, ohne daß ständig die Werkzeuge gewechselt werden müssen.
Mehrspindelbohrmaschinen haben mehrere gleichzeitig angetriebene Gelenkspindeln, mit denen man gleichzeitig mehrere Löcher in ein Werkstück bohren kann. Bei Ausrüstung mit einem Revolverkopf können mehrere Arbeitsgänge an einer Bohrung, wie Bohren, Senken, Reiben oder Gewindeschneiden, nacheinander ausgeführt werden.
Radialbohrmaschinen haben einen um eine Säule schwenkbaren und höhenverstellbaren Ausleger, auf dem der Spindelkasten radial verschiebbar ist. An sperrigen Werkstücken können somit mehrere Bohrungen angebracht werden, ohne daß das Werkstück versetzt werden muß.
Koordinaten- oder *Lehrenbohrmaschinen* ermöglichen die Herstellung von genauen Bohrungsdurchmessern und -abständen ohne Verwendung von Bohrlehren. Hierzu sind die Maschinen hochpräzise ausgeführt und besitzen Koordinatenmeßsysteme für die Verstellachsen, die das Einstellen und Ablesen auf $^1/_{1000}$ mm gestatten. Auch auf *Feinbohrmaschinen* kann durch Aufbohren vorgebohrter Löcher hohe Maßgenauigkeit erreicht werden.
Mit *Waagerecht-Bohr-und-Fräs-Werken* können in einer Aufspannung des Werkstücks nacheinander verschiedenartige Arbeiten ausgeführt werden, wie Bohren, Reiben, Ausbohren, Naben abdrehen und Flächen anfräsen. Sie haben einen festen Ständer und drehbaren Aufspanntisch oder bei großer Bauausführung einen verstellbaren Ständer und festen Tisch bzw. feste Grundplatte. Der Ständer trägt den höhenverstellbaren Spindelkasten. Die Hauptspindel liegt meist waagerecht. Mit einem Gegenhalter, einer 2. Säule, können lange Bohrstangen abgestützt werden. Durch die Verstellbarkeit in allen 3 Koordinaten sind Bohrwerke universell anwendbar.
Besondere Bohreinheiten ermöglichen nach einem Baukastensystem den Aufbau von Sondermaschinen für Fertigungsstraßen.

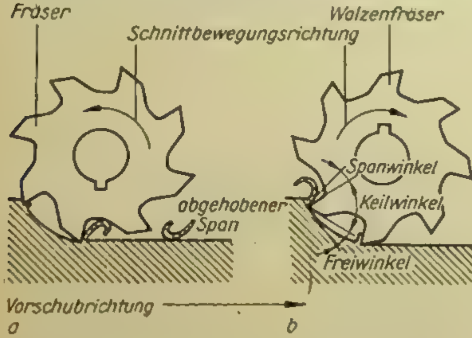


Abb. 8.3.2-18 *a Gleichlauf- und b Gegenlauffräsen*

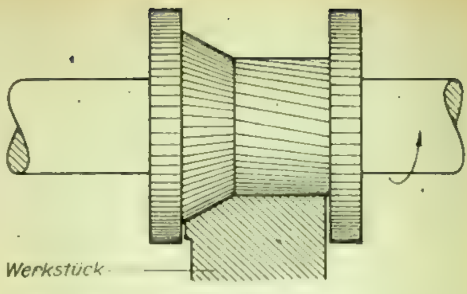


Abb. 8.3.2-19 *Satzfräser*

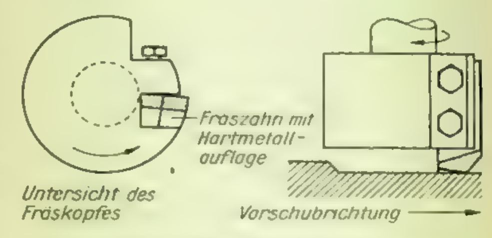


Abb. 8.3.2-20 *Schlagzahnplanfräsen*

Fräsen und Sägen. *Fräsen* ist ein spanendes Trennverfahren, bei dem ein rotierendes Werkzeug eingesetzt wird, an dessen Umfang oder Stirnseite mehrere Schneiden angeordnet sind, die nacheinander zum Eingriff kommen. Die Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs ist dabei die Hauptschnittbewegung, die Vorschubbewegung wird vom Werkstücktisch ausgeführt. Dabei können Umfangsschnitt- und Vorschubrichtung gleichgerichtet (*Gleichlauffräsen*, Abb. 8.3.2-18a) oder entgegengerichtet verlaufen (*Gegenlauffräsen*, Abb. 8.3.2-18b). Üblich ist das Gegenlauffräsen, da das Gleichlauffräsen besondere Ansprüche an die Maschinenkonstruktion stellt. Es gibt eine Vielzahl spezieller Fräswerkzeuge, die auf 2 Grundformen basieren: den Walzenfräser und den Stirnfräser.
Walzenfräser haben auf dem Umfang angeordnete Schneiden, deren Schnittkanten parallel zur Drehachse oder zum Erreichen eines ruhigeren Schnitts spiralig verlaufen. Sehr schmale Walzenfräser werden *Scheibenfräser* genannt. Walzenfräser erzeugen mit dem Längsvorschub und einem Quervorschub pro Hub des Tischs ebene Flächen oder eine dem Werkzeugquerschnitt entsprechende Nut. Durch Zusammensetzen verschiedener Walzenfräser zu einem *Satzfräser* (Abb. 8.3.2-19) können vielgestaltige Profile gefräst werden.
Beim *Stirnfräser* sind die Zähne an der Unterseite, der Stirnseite, teilweise bis zum Umfang herumgezogen. Größere Stirnfräser werden als *Messerköpfe* bezeichnet. Ihre Messer sind auswechselbar und meist mit Hartmetall oder Schneidkeramik bestückt. Kleine Stirnfräser werden *Schaftfräser* genannt. Messerköpfe werden bis ≈ 1 m Durchmesser hergestellt und

für die Bearbeitung großer Flächen eingesetzt. Hohe Schnittgeschwindigkeiten ergeben gute Oberflächen. Dies wird beim *Schlagzahnfräser* ausgenutzt, wobei ein einschneidiger Fräskopf (Abb. 8.3.2-20) verwendet wird.
Weitere Fräsverfahren sind das *Nutenfräsen* mit profilierten Schaftfräsern, das *Gewindefräsen*, vor allem für kurze Gewinde geeignet (Abb. 8.3.2-21), und das *Zahnradfräsen*. Zahnräder werden mittels profilierten Scheibenfräsern im Einzelteil- oder produktiver im Abwälzverfahren hergestellt (Abb. 8.3.2-22). *Gewindewirbeln* wird zur Herstellung langer Gewinde, z. B. für Leitspindeln, eingesetzt. Dabei bewegen sich die innen liegenden Messer eines Wirbelkopfs mit hoher Drehzahl um das sich langsam drehende Werkstück (Abb. 8.3.2-23). Das gewirbelte Gewinde weist hohe Genauigkeit und Oberflächengüte auf.
Fräsmaschinen haben je einen Antrieb für die Frässpindel und den Tisch. Beide Antriebe sind zur Anpassung mit schaltbaren Zahnraduntersetzungsgetrieben ausgerüstet. Die *Waagerecht-* oder *Konsolfräsmaschine* wird am häufigsten eingesetzt. Neben diesen *Universalfräsmaschinen* gibt es weitere, spezifischen Arbeitsbedingungen angepaßte Bauformen, wie *Senkrechtfräsmaschinen* in Konsol- oder Tischausführung mit senkrechter Spindel, *Langfräsmaschinen* in Einständer- oder Portalbauweise mit mehreren Frässupporten für große Werkstücke und große Spanleistungen, *Wälzfräsmaschinen* für die Zahnradherstellung und *Kopierfräsmaschinen*, die mittels elektro-hydraulischer Kopiersysteme ein Fertigungsmuster abtasten und danach maßstabsgenau ein Werkstück bearbeiten.

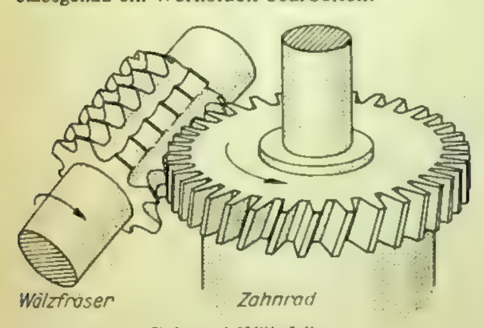


***Abb. 8.3.2-21** Zahnrad-Wälzfräsen*

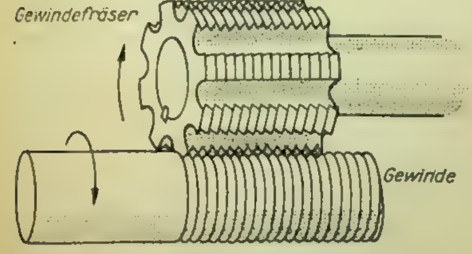


***Abb. 8.3.2-22** Gewindefräsen*

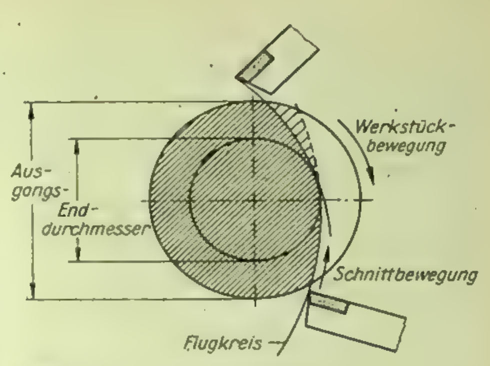


***Abb. 8.3.2-23** Gewindewirbeln*

Sägen dienen zum Trennen von Werkstoffen, wobei durch eine kreisförmige, wie beim Fräsen, oder geradlinige Schnittbewegung die hintereinander angeordneten Sägezähne zum Eingriff kommen. Bei den *Bügelsägen* führt das in einem Bügel gespannte Sägeblatt eine hin- und hergehende Bewegung aus, wobei durch Abheben beim Rückhub nur in Zugrichtung gesägt wird. *Bandsägen* haben ein über Umlenkscheiben endlos umlaufendes Sägeblatt, wodurch eine ununterbrochene Schnittbewegung entsteht. Für schwere Schnitte werden *Kreissägen* verwendet, die rotierende Sägeblätter bis über 1 m Durchmesser haben können. Der Vorschub wird so geregelt, daß auch bei veränderlichem Spanquerschnitt eine gleichgroße Schnittkraft entsteht. Die Verminderung der Werkstoffestigkeit bei Erwärmung wird bei *Warmkreissägen* und *Trennsägen* ausgenutzt, wobei letztere ohne Schneiden am Werkzeug nur mittels der Reibungswärme trennen.
Schleifen mit rotierendem Schleifkörper. Das *Schleifen* ist ein Feinbearbeitungsverfahren zur Herstellung genauester und glattester Oberflächen. Es ist eine Endbearbeitung bereits vorbereiteter Flächen, wobei nur noch eine dünne Werkstoffschicht, meist weniger als 1 mm, abgeschliffen wird. Als Werkzeug findet ein *Schleifkörper* Verwendung, der auf eine Schleifspindel gespannt mit dieser rotiert. Die Spanabnahme erfolgt durch die winzigen Schneidkanten einer Vielzahl nur millimetergroßer Schleifkörner, die durch ein *Bindemittel* zusammengehalten und mit diesem den Schleifkörper ergeben. Von der Härte der Schleifkörner, die meist aus *Elektrokorund* (Al_2O_3) oder *Siliziumkarbid* (SiC, vgl. 6.2.3.) bestehen, von der *Korngröße* sowie der Art und dem Volumenanteil des Bindemittels hängen die Schleifeigenschaften des Schleifkörpers ab. Durch den Herstellungsprozeß entsteht eine bestimmte *Bindungshärte*, die in Härtegraden angegeben wird. Neben *mineralischen* (Silikat-) und *organischen* (Gummi-)

Bindungen ist die porzellanähnliche *keramische Bindung* die häufigste. Die Schleifmittelkörnung wird in Zahlen entsprechend der Siebgrößen angegeben, nach denen die Kornfraktionen ausgesiebt werden. Schleifkörner werden staubfein und bis mehrere Millimeter groß verwendet.
Schleifkörper sind rotationssymmetrisch mit verschiedenen Querschnittsformen oder werden aus Segmenten zusammengesetzt. Sie werden zwischen Aufnahmeflansche gespannt oder auf Aufnahmen aufgeklebt.
Schleifbänder bestehen aus endlosen Papier- oder Textilbändern mit aufgeleimten Schleifkörnern. Zur Auslösung des Spanvorgangs und um möglichst viele Schneiden pro Zeit in Eingriff zu bringen, läuft der Schleifkörper mit hoher Umfangsgeschwindigkeit, i. allg. mit mindestens 35 m/s, um. Durch Weiterentwicklung der Schleifkörper wird die Umfangsgeschwindigkeit zur Erhöhung der Spanleistung ständig gesteigert und nähert sich der Zerreißgeschwindigkeit, die für keramische Schleifkörper bei ≈ 150 m/s liegt. Durch dieses *Hochgeschwindigkeitsschleifen* können beträchtliche Spanmengen bewältigt werden, so daß oftmals eine Vorbearbeitung der zu schleifenden Flächen unnötig ist.
Schleifmaschinen sind Präzisionsmaschinen, die sich nach der Form und Lage der zu schleifenden Werkstücke ordnen lassen (Tafeln 31, 32, 33). *Flächenschleifmaschinen* haben eine waagerechte Schleifspindel für den Umfangsschliff oder eine senkrechte für den Stirnschliff, der höhere Abtragleistungen ermöglicht. Der Längsvorschub erfolgt durch den Arbeitstisch, der Quervorschub und die Zustellung durch den Schleifsupport. *Außenrundschleifmaschinen* (Tafel 31) bearbeiten lange Teile im Längsschleifverfahren (Abb. 8.3.2-24) oder kurze im Einstechverfahren, wobei der Längsvorschub durch den Maschinentisch entfällt. Das Werkstück wird zwischen den Spitzen des Werkstückspindelstocks und des Reitstocks gespannt und durch einen Mitnehmer in Rotation versetzt. Die Spitzen drehen sich zur Erhöhung der Genauigkeit dabei nicht. Ähnlich arbeitet die *Innenrundschleifmaschine*, wobei das Werkstück in einem Spannfutter aufgenommen wird.

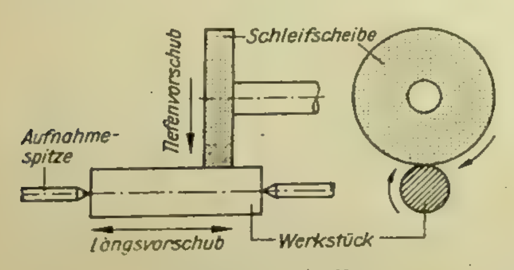


Abb. 8.3.2-24 Außenrundschleifen

Zur Erreichung der hohen Umfangsgeschwindigkeiten sind Schleifspindeldrehzahlen bis 120000 U/min notwendig. Beim Innen- und Außenrundschleifen wird im Gegenlauf geschliffen. Bei *spitzenlosen Schleifmaschinen* bilden der breite Schleifkörper mit dem leicht schräggestellten und deshalb antreibenden *Regelkörper* einen Schleifspalt, den das Werkstück unter Rotation durchläuft (Durchgangsschleifen). Eine Führungsleiste, das *Stützlineal*, stützt das Werkstück ab. Diese Maschinen eignen sich besonders für die Massenfertigung.
Da die Schneidkanten des Schleifkörpers abstumpfen, muß der Schleifkörper neu geschärft werden. Das geschieht in der Maschine durch die *Abrichteinrichtung* mit einem Abrichtdiamant.
Form- oder *Profilschleifverfahren* übertragen ein durch einen Kopierabrichter erzeugtes Profil des Schleifkörpers auf das geschliffene Werkstück wie beim Gewindeschleifen mit ein- oder mehrprofiligen Schleifkörpern.
Werkzeugschleifmaschinen dienen zur Herstellung und Regenerierung (Scharfschleifen) spanender Werkzeuge.
Trennschleifmaschinen benutzen nur millimeterdicke Trennschleifkörper zum schnellen Trennen von Profilstangen bei höchsten Schnittgeschwindigkeiten bis ≈ 120 m/s.
Zahnradschleifmaschinen bearbeiten im Abwälzverfahren die Flanken gehärteter Zahnräder (Tafel 33).
Hilfsstoffe. Zur Erhöhung der Spanleistung und Vermeidung des Schleifstaubs wird nach Möglichkeit mit Zusatz von Hilfsstoffen im *Naßschliff* gearbeitet. Der richtigen Auswahl der Hilfsstoffe kommt große Bedeutung zu. Anstelle der mineralölhaltigen *Emulsion* werden auch *Fluide*, umweltfreundlichere Salzlösungen, eingesetzt (vgl. 8.5.3.). Hilfsstoffe werden in besonderen Hilfsstoffaggregaten gesammelt, gereinigt und von dort unter Druck der Schleifstelle zugeführt. Maschinenverdecke und Absaugungen verhindern ein übermäßiges Austreten der Hilfsstoffnebel.
Schleifen mit geradlinig bewegten oder biegsamen Schleifkörpern – Läppen. Das *Ziehschleifen* oder *Honen* dient der Verbesserung vorgeschliffener Bohrungen. Dazu wird ähnlich einer Reibahle ein mit leistenförmigen Schleifkörpern besetztes Werkzeug durch die Ziehschleif- oder Honmaschine im zu bearbeitendem Werkstück in Achsrichtung auf und ab und gleichzeitig drehend bewegt. Die Ziehsteine werden dabei gegen die Arbeitsfläche gedrückt unter reichlicher Hilfsstoffzuführung zum Abführen der Späne. Außenflächen werden ähnlich im *Schwingziehschleifen* bearbeitet. Ein Werkzeug mit 1 bis 3 Ziehschleifsteinen wird an die umlaufende Arbeitsfläche gedrückt und in axiale Schwingung versetzt. Das Verfahren wird auch *Kurzhubhonen* oder *Superfinishen* genannt.
Beim *Kontaktschleifen* sorgt eine Kontaktrolle für das Anpressen des verwendeten Schleifbands

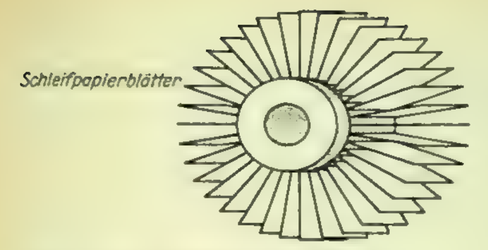


Abb. 8.3.2-25 Biegsamer Schleifkörper

an die Arbeitsfläche. Ebenso wie das Schleifband in Körnung und Härte dem Werkstoff anzupassen ist, muß die Kontaktrolle in ihrer Härte und ihrem Material (Metall oder Gummi) ausgewählt werden. Wie bei der Verwendung umlaufender, biegsamer Schleifkörper aus Schleifpapieren (Abb. 8.3.2-25) können auch mehrfach gekrümmte Flächen bearbeitet werden. Das Verfahren wird hauptsächlich zur Oberflächenveredlung (Schönheitsschliff) und zur galvanischen Vorbereitung eingesetzt.

Vibrationsgleitschleifen nutzt die Bewegung, die in einem Vibrator zwischen eingeschütteten Werkstücken und kleinen Schleifkörperstücken entsteht, um durch das Vorbeigleiten an den Schleifkörpern die Werkstücke zu entzundern, entgraten, glätten oder polieren. Es wird vorzugsweise unter Zusatz von Hilfsstoff gearbeitet.

Beim *Läppen* wird ungebundenes, loses Schleifmittel zur Spanabnahme benutzt. Die notwendigen Kräfte und Bewegungen werden durch *Läppwerkzeuge*, wie *Läppdorne* für Bohrungen oder Platten für ebene Flächen, oder durch Bewegen des Läppkorns in einem Kraftfeld erzeugt. Läppwerkzeuge oder -körner bestehen aus relativ weichem Material, meist Grauguß, und werden von Hand oder maschinell bewegt. Das Schleifmittel gemischt mit einem Hilfsstoff, z. B. Petroleum, ergibt das *Läppmittel*. Schleifmittel sind z. B. feinkörnige Korunde, Chromoxid und Polierrot. Durch Läppen werden die technisch glattesten und genauesten Oberflächen erzeugt, z. B. für Meßkaliber, Endmaße u. a. Meßzeuge sowie Wälzkörper für Kugellager.

Beim *Trommeln* in umlaufenden Behältern entsteht durch das Umwälzen der Werkstücke und Schleifsteinchen der Läppvorgang. Beim *Strahlläppen* wird mit einem unter Druck stehenden Läppmittelstrahl die Werkstückoberfläche entgratet und poliert. Das *Stoßläppen* nutzt die Energie der Ultraschallschwingungen eines Generators mit 30 bis 50 kHz, um das Läppkorn zwischen dem Werkstück und einem entsprechenden Formwerkzeug zu bewegen.

8.3.3. Abtragen

Das *Abtragen* wird vorzugsweise für die Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe oder komplizierter Werkstückformen angewendet. Nach dem Wirkprinzip kann es in *chemisches*, *elektrochemisches* und *thermisches Abtragen* unterteilt werden. Das Abtragen ergänzt die spanende Bearbeitung. Der Energieaufwand ist wesentlich höher als beispielsweise beim Schleifen (1:5 bis 1:50), die Abtragsleistung jedoch viel niedriger (1:0,1 bis 1:0,0001). Günstige mittlere Werte erreicht die elektroerosive Bearbeitung mit einer Abtragsleistung von 1:0,02 und einem Energiebedarf von 1:4.

Chemisches Abtragen. Die abtragende Wirkung verschiedener Chemikalien auf Metalle wird beim *Beizen* und *Ätzen* genutzt. Das Beizen dient mehr der Oberflächenbehandlung, während das Ätzen zum kontrollierten Metallabtrag eingesetzt wird. Das *chemische Abtragen* stellt eine Fortsetzung dieser Technik dar und wurde industriell zuerst in der Flugzeugindustrie eingesetzt, später in der Elektroindustrie zur Herstellung von Leiterplatten. Bevorzugte Werkstoffe für chemisches Abtragen sind Aluminiumlegierungen und Elektrolytkupfer. Zur Beherrschung des Verfahrens ist die Auswahl der Chemikalien, ihre Konzentration und Temperatur besonders zu beachten. Als günstiges Ätzmittel für Aluminiumlegierungen hat sich Natronlauge (NaOH) bewährt. Ein Ätzmittel für Kupfer ist die Salpetersäure (HNO_3). Mit Erhöhung der Laugenkonzentration und steigender Badtemperatur steigt die Abtraggeschwindigkeit. Die erreichte Oberfläche ist von der Kornstruktur des Werkstoffs abhängig. Feinkörnige Werkstoffe ergeben bessere Oberflächen. Deshalb sollten nur homogenisierte Werkstücke chemisch abgetragen werden. Um ungewolltes Abtragen zu verhindern, müssen die entsprechenden Stellen durch einen Lacküberzug geschützt oder mit einem mechanischen Schutz versehen werden. Nach dem chemischen Abtragen werden die Werkstücke in Bädern gereinigt und neutralisiert.

Elektrochemisches Abtragen. Vom Wirkprinzip gesehen, stellt das elektrochemische Abtragen oder *Elysieren* die Umkehr des Galvanisierungsprozesses dar. Beim Galvanisieren soll das Werkstück vom Werkstoff der Anode überzogen werden, beim Elysieren wirkt das Werkstück als Anode und gibt Werkstoffabtrag an den Elektrolyt ab. Da die Bearbeitung des Werkstücks durch das Auflösen des Metalls am anodisch geschalteten Werkstück erfolgt, wobei eine Gleichstromquelle den Ladungstransport zwischen Werkstück, Elektrolyt und Katode bewirkt, kann der Abtragvorgang durch Ausbildung des Werkzeugs als *Formelektrode*, und damit Lokalisierung des Vorgangs, intensiviert werden. Als *Elektrolyt* wird eine wäßrige NaCl-, KNO_3- oder $NaNO_3$-Lösung verwendet.

Durch das Isolieren bestimmter Werkzeugflächen wird örtlich nicht beabsichtigtes Elysieren

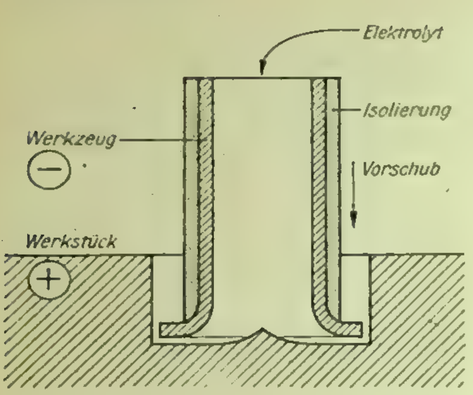


Abb. 8.3.3-1 *Elysier-Bohren*

am Werkstück verhindert (Abb. 8.3.3-1). Bei Beibehaltung der vom Spanen her bekannten Bewegungen und Ausbildung der Elektrode entsprechend dem spanenden Werkzeug ergeben sich die Verfahren *Elysier-Drehen, -Fräsen, -Senken, -Trennen* und *-Schleifen*, wobei vor allem die sich bildende Passivschicht mechanisch beseitigt wird. Besondere Bedeutung hat das Elysier-Schleifen erlangt, das wirtschaftlich für das Regenerieren und Scharfschleifen von hartmetallbestückten Werkzeugen eingesetzt wird. Bedeutung für die Praxis haben noch das *Elysier-Entgraten* und das *elektrolytische Polieren*.

Thermisches Abtragen. Der Metallabtrag erfolgt elektrothermisch oder -erosiv.

Bei der *Elektroerosion* werden durch kurze, rasch hintereinanderfolgende Entladungen Funken erzeugt (Funkenerosion), und dadurch oder durch einen pulsierenden Lichtbogen (Elektroimpulsion) wird abgetragen, indem kontinuierlich kleinste Teile aus dem Werkstück herausgerissen werden. Als Werkzeug dient eine Elektrode, deren Querschnitt bzw. Gesamtform entsprechend der gewünschten Abtragsform gestaltet ist (Tafel 32), aber das Werkstück nicht unmittelbar berührt (Abb. 8.3.3-2). Das Werkstück muß elektrisch leitfähig sein. Durch das flüssige *Dielektrikum* werden die Funken gebündelt, der geschlagene Kanal entionisiert, der Abtrag weggespült und die Formstelle gekühlt. Es können sehr tiefe Bohrungen erzeugt und auch schwachwandige Werkstücke bearbeitet werden, da die Bearbeitungskräfte minimal sind. Elektroerosive Bearbeitung wird besonders bei der Herstellung von Gesenken und feinen Schnittformen eingesetzt.

Elektrothermisches Abtragen. Beim Abtragen mit steuerbaren, energiereichen Strahlen werden diese auf die Bearbeitungsstelle fokussiert. Durch die örtliche starke Erwärmung erfolgt der Werkstoffabtrag.

Elektronenstrahlbearbeitung. Dabei dient ein scharf gebündelter Elektronenstrahl hoher Energiedichte als Werkzeug, durch den der Werkstoff in einem genau definierten Bereich durch Verdampfen abgetragen wird. Der fokussierte Elektronenstrahl wird in Kreis- oder Profilform über die Werkstückoberfläche geführt. Es können damit sowohl in Metallen als auch in nichtleitenden Materialien, wie keramischen Werkstoffen, feinste Bohrungen von wenigen tausendstel Millimetern eingebracht und Werkstücke, wie Düsen, Ziehsteine oder Lagersteine aus synthetischem Korund u. a., bearbeitet werden. Der Elektronenstrahl als feinstes Werkzeug eignet sich ebenfalls für die Bearbeitung von Miniaturbausteinen. Nachteilig ist, daß die Bearbeitung im Vakuum erfolgen muß.

Laserbearbeitung wird mit Festkörper-, Gas-, Riesenimpuls- oder Moleküllasern durchgeführt (vgl. 12.3.4.). Die erzeugten Bohrungen sind nicht so exakt zylindrisch wie beim Elektronenstrahl. Zur Herstellung komplizierter Querschnittsformen sind entsprechende Abdeckmasken notwendig, die jedoch einem schnellen Verschleiß unterliegen.

Plasmabearbeitung. Zur Erzeugung des Plasmas wird Gas, z. B. Argon oder Stickstoff, in einem Brenner mit Hilfe eines Lichtbogens derart aufgeheizt, daß es in den Plasmazustand übergeht, sich stark ausdehnt und mit hoher Geschwindigkeit aus dem Brenner austritt. Der Plasmastrahl arbeitet als abtragendes Werkzeug. Er wird eingesetzt zur Vorbehandlung von Werkstücken aus hoch-, hitze- und korrosionsbeständigen Nickellegierungen, zur Entfernung von Gußhäuten und auch zur Herstellung von Führungsrillen in Seiltrommeln u. a. Aber auch kleine Bohrungen können hergestellt bzw. bearbeitet werden.

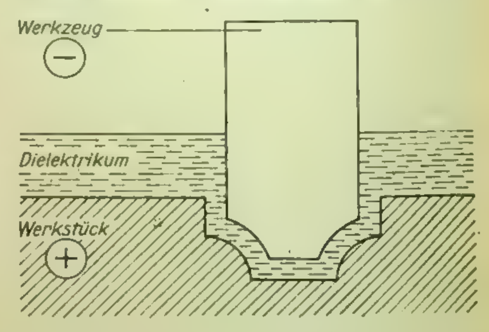


Abb. 8.3.3-2 *Erosives Senken*

8.4. Fügen

Fügen ist das Zusammenbringen von 2 oder mehreren Werkstücken bzw. von Werkstücken mit formlosem Stoff. Es wird in *lösbare* und *unlösbare Verbindungen* untergliedert. Erstere werden mit Hilfe von Schrauben, Muttern, Bol-

zen, Keilen, Splinten u. a. hergestellt, letztere durch Schweißen, Löten, Kleben, Nieten, Schrumpfen, Aus- und Vergießen u. a.

8.4.1. Schrauben

Die zu verbindenden Teile werden durch eine im Schaft der Schraube erzeugte Zugspannung gehalten. Die Zugspannung entsteht beim Eindrehen der Schraube in das Gegenstück, die Mutter oder Gewindebohrung. Die Kopfform ist dem Verwendungszweck angepaßt. Die Drehbewegung wird über den Kopf vornehmlich mit Schraubenziehern und -schlüsseln eingeleitet. Die Verbindung wird durch die geringe Steigung im Gewinde und bei stark wechselnder Beanspruchung durch Sicherungselemente fixiert (vgl. 9.1.1.).

8.4.2. Schweißen

Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen mittels Wärme oder Druck oder beidem, wobei mit oder ohne artgleichen Zusatzwerkstoff gearbeitet wird. Geschweißt werden sowohl Metalle als auch Plaste (vgl. 5.1.2.). Man unterscheidet Verbindungs- und Auftragsschweißen.
Verbindungsschweißen dient der Herstellung von Schweißteilen.
Auftragsschweißen ergibt eine örtliche Volumenvergrößerung als Korrosionsschutz oder dient zur Behebung von Verschleißerscheinungen.
Schweißarten und Hilfsstoffe. Die *Schweißart* wird durch die Anwendung von Wärme und Druck zur Verbindung bestimmt (Tab. 8.4.2-1).
Je nach Kombination von Schweißart und Wärmequelle ergeben sich die *Schweißverfahren*.
Beim *Handschweißen* werden alle Arbeitsverrichtungen von Hand ausgeführt. *Mechanisches Schweißen* arbeitet mit mechanischer Schweißdrahtzuführung oder Werkstückbewegung. Beim *teilautomatischen Schweißen* erfolgt die Einleitung, Kontrolle, Korrektur und Beendigung des Schweißvorgangs noch von Hand, während beim *automatischen Schweißen* der Vorgang nach der Einleitung völlig automatisch abläuft.
Bei einigen Schweißverfahren sind Hilfsstoffe zur Verbindung und Qualitätssteigerung erforderlich, wie z. B. Elektrodenumhüllung oder -füllung, Pulver, Paste, Gas und Vakuum.

Tab. 8.4.2-1 *Schweißarten*

Schweißart	Wirkenergie	Werkstoffzustand
Schmelzschweißen	Wärme	flüssig
Preßschweißen	Wärme und Druck	plastisch
Kaltpreßschweißen	Druck	fest

Benennung	*Sinnbild*	*Fugenform*
Bördelnaht		
V-Naht		
Y-Naht		
Kehlnaht		
K-Naht		
I-Naht		
X-Naht		
U-Naht		
HV-Naht		

Abb. 8.4.2-2 *Schweißnahtformen*

Schweißnahtformen werden nach Art und Zweck der Konstruktion, Beanspruchung, Werkstoffart, -dicke, Schweißposition und -verfahren gestaltet (Abb. 8.4.2-2).
Elektrisches Lichtbogenschweißen. Als *Schweißstromquellen* werden Schweißumformer und -gleichrichter bei *Gleichstromschweißung* und Schweißtrafos bei *Wechselstromschweißung* verwendet. Am häufigsten wird Gleichstrom mit 30 V und 100 bis 500 A eingesetzt.
Zur Zündung des *Lichtbogens* muß die Elektrode mit dem Werkstück kurzzeitig in Berührung gebracht werden, damit die Leerlaufspannung der Schweißstromquelle zusammenbricht und die Stromstärke den Kurzschlußwert erreicht. Bei Wechselstromschweißung muß der Lichtbogen ständig neu gezündet werden. Die dazu erforderliche hohe Leitfähigkeit im Lichtbogen wird durch Hilfsstoffzusatz erreicht. Die *Elektroden* bestehen aus artgleichem Werkstoff wie die zu schweißenden Teile.
Offenes Lichtbogenschweißen. Bei der Methode nach *Slawjanow* brennt der Lichtbogen sichtbar zwischen Metallelektrode und Werkstück (Abb. 8.4.2-3). Der Vorteil des Verfahrens besteht in der Schweißstromzuführung durch die Elektrode, wodurch gleichzeitiges Schmelzen

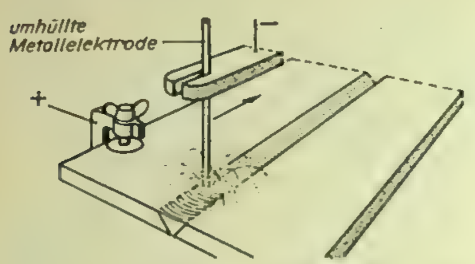


Abb. 8.4.2-3 Lichtbogen-Handschweißen nach Slawjanow

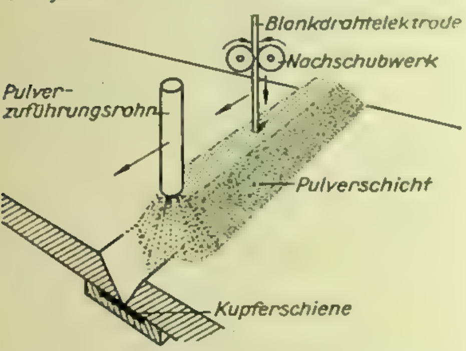


Abb. 8.4.2-4 Unter-Pulver- (UP-) Schweißen

von Zusatzwerkstoff und Werkstück eintritt. Für die Hauptanwendungsgebiete Fahrzeug-, Stahl- und Schiffbau werden vorwiegend umhüllte Elektroden eingesetzt. Die nackten Elektroden haben nur noch geringe Bedeutung, da meist nur ungenügende Qualität der Schweißverbindung erreicht wird. Die Schweißgeschwindigkeit wird durch mechanisierte Verfahren erhöht.

Unter-Pulver-Schweißen. Beim *UP-Schweißen* (Abb. 8.4.2-4) brennt der Lichtbogen unter einer Schweißpulverschicht zwischen dem Zusatzwerkstoff (Blankdraht) und dem Grundwerkstoff in einer durch Schlacke und Schmelzbad erzeugten Kaverne. Die Pulverschicht schützt die Schweißverbindung, hauptsächlich vor Sauerstoff und Stickstoff. Unter der zu entfernenden Schlackeschicht befindet sich die Schweißnaht von hoher Qualität. Das Verfahren eignet sich gut zur Mechanisierung, Teilautomatisierung und Automatisierung. Zur Leistungssteigerung werden mehrere Elektroden, wie z. B. bei der Doppelkopf-, Tandem-, Paralleldrahtschweißung, und Bandelektroden eingesetzt. Das UP-Verfahren findet breite Anwendung zum Schweißen von Stahl und NE-Metallen.

Schutzgaslichtbogenschweißen. Die Schutzfunktion übernimmt hier ein Schutzgas. Somit entfällt die aufwendige Entfernung der Schlackeschicht. Die Schutzgase richten sich nach den zu verschweißenden Werkstoffen.

Das *CO_2-Schutzgasschweißverfahren* wird bei Massenstählen eingesetzt. Das *MIG*-(Metall-Inertgas-) und *WIG*-(Wolfram-Inertgas-)*Schweißen* (Abb. 8.4.2-5) findet für Sonderstähle und NE-Metalle Anwendung, wobei im MIG-Verfahren Blechdicken > 5 mm und im WIG-Verfahren Blechdicken von 1 bis 5 mm geschweißt werden. Als Schutzgas dienen Argon oder Helium bzw. ein Gemisch aus beiden. Während beim MIG-Schweißen eine nackte Elektrode von artgleichem Zusatzwerkstoff abschmilzt, brennt der Lichtbogen beim WIG-Schweißen zwischen der nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück. CO_2- und MIG-Schweißen erfolgen ausschließlich mit Gleichstrom (Pluspol am Zusatzwerkstoff). WIG-Schweißen kann mit Gleichstrom (Minuspol vorwiegend an Wolframelektrode) und mit Wechselstrom, z. B. bei Aluminium und dessen Legierungen, erfolgen.

Das *Plasmaschweißen* unterscheidet sich vom WIG-Schweißen im wesentlichen durch einen anders gestalteten Düsenaufbau und die höhere Wärmeeinbringung durch den Plasmastrahl. Die Vorteile sind höhere Schweißgeschwindigkeit und -leistung bei tieferem und schmalem Einbrand. Als Schutzgas wird Argon verwendet. Das Verfahren wird vornehmlich zum Verbindungsschweißen eingesetzt (Tafel 33).

Beim *Arcatomschweißen* brennt der Wechselstromlichtbogen zwischen 2 Wolframelektroden in einer Wasserstoffatmosphäre. Durch die konzentrierte Wärmeeinbringung entsteht nur geringer Verzug. Weitere Vorteile sind hohe Schweißgeschwindigkeit, glatte, poren- und oxidfreie Schweißnähte mit guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften. Die Haupteinsatzgebiete des Verfahrens sind Herstellung und Reparatur von Werkzeugen, Auftragen bei Verschleißteilen, Verbinden von Stahlblechen geringer Dicke, von Leichtmetallen und deren Legierungen.

Beim *Elektrogasschweißen* gleicht der gerätetechnische Aufbau im wesentlichen dem Elektroschlackeschweißen (s. u.). Unter CO_2-Schutzgas brennt zwischen dem Zusatzdraht und dem Werkstück ein offener Lichtbogen. Bei senkrechter Naht wird von unten nach oben geschweißt. Die geringe erforderliche Spaltbreite

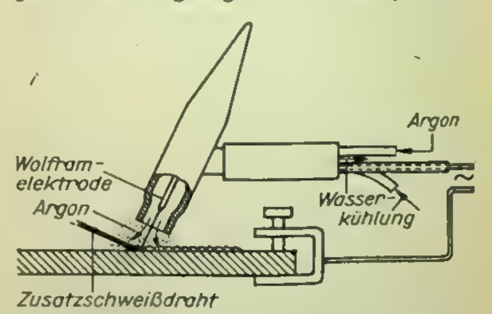


Abb. 8.4.2-5 Wolfram-Inertgas- (WIG-) Schweißen

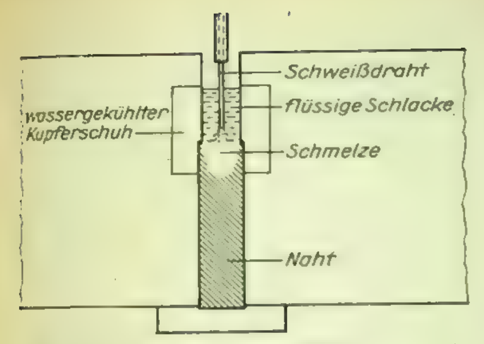


Abb. 8.4.2-6 Elektro-Schlacke-(ES-)-Schweißen

senkt den Zusatzdrahtverbrauch und erhöht die Schweißgeschwindigkeit. Außerdem läßt sich der Schweißprozeß beobachten. Dieses Verfahren wird bei langen senkrechten Nähten, wie sie im Großkessel-, Schiff- und Stahlbau vorkommen, angewendet.

Das *mechanisierte schutzgaslose Schweißen* mit speziellen Zusatzdrähten wurde für Stahlkonstruktionen im Freien entwickelt, weil starker Wind die Schutzgashülle zerstört. Die Zusatzdrahte enthalten Zer, Tantal, Rubidium und Zäsium, wodurch sich die Lichtbogenstabilität erhöht und die Oberflächenspannung des Eisens verringert. Ferner werden Pulverdrähte mit hohen Karbonatanteilen verwendet. Das beim Abschmelzen frei werdende CO und CO_2 verdrängt die Luft aus der Schweißzone. Weiterhin werden den Drähten schlackebildende Stoffe, Desoxydationsmittel und stickstoffbindende Elemente beigemengt.

Elektro-Schlacke-(ES-)Schweißen. Ein senkrechter 15 bis 30 mm breiter Spalt zwischen den zu verschweißenden Stahlteilen wird unten durch ein U-förmiges Blech und seitlich durch 2 nachführbare Kupferschuhe verschlossen (Abb. 8.4.2-6). In dem eingefüllten Zünd- und Schweißpulver wird ein Lichtbogen gezündet. Das entstehende Schlackebad wird vom Strom durchflossen, und die Widerstandserwärmung schmilzt Zusatzdraht und zu verbindende Flanken auf. Der Lichtbogen erlischt nach dem Entstehen des Schmelzbades. Weitere Zugabe von Pulver sichert die Schlackebildung. Durch Nachführen der Kupferschuhe erstarrt die Schmelze im Schweißspalt. Je nach Werkstückbreite können gleichzeitig mehrere Schweißdrähte zum Einsatz kommen. Dieses Schweißverfahren hat die höchste Abschmelzleistung und ermöglicht das Verschweißen von Stahlteilen mit einer Dicke bis zu 2 m in einer Lage. Auch Auftragsschweißung kann erfolgen.

Elektrisches Widerstandsschweißen. Die zu verbindenden metallischen Werkstücke, z. T. auch verschiedene Metalle, werden zusammengepreßt und vom elektrischen Strom durchflossen. Durch die Widerstandserwärmung erfolgt das Aufschmelzen und Verschweißen beider Teile. Heute ist eine rationelle Fertigung ohne die folgenden Widerstandsschweißverfahren im Flugzeug-, Fahrzeug-, Maschinen- und Gerätebau sowie in der Elektrotechnik undenkbar.

Beim *Punktschweißen* werden 2 sich überlappende Bleche zwischen 2 stabförmigen Elektroden zusammengepreßt und punktweise verschweißt (Tafel 33).

Das *Nahtschweißen* erfolgt mit 2 ständig andrückenden Rollenelektroden, die praktisch eine Reihenpunktschweißnaht erzeugen. Die Anwendung reicht von Folien bis zu einer Gesamtblechdicke von 40 mm. Außer stationären Geräten finden auch *Handpunktschweißzangen*, z. B. im Fahrzeugbau, und *Bolzenanschweißgeräte* Verwendung.

Durch *Buckelschweißen* werden meist Bleche für Massenartikel sehr wirtschaftlich verbunden. An einem der beiden Bleche werden Buckel bzw. Sicken angebracht, wodurch der Schweißvorgang örtlich begrenzt wird (Abb. 8.4.2-7).

Beim *Stumpfschweißen* wird die gesamte Berührungsfläche vom Schweißstrom durchflossen. Von den als Spannbacken ausgeführten Elektroden ist eine in Stauchrichtung beweglich. Es wird unterschieden zwischen Wulst- bzw. Preßstumpfschweißen und Abbrennstumpfschweißen. Beim *Wulststumpfschweißen* werden die planparallelen Stoßflächen aneinandergepreßt und bei Schweißtemperatur kräftig gestaucht. Beim *Abbrennstumpfschweißen* werden die unbearbeiteten Stoßflächen mehrfach zur Berührung gebracht, und durch die Erwärmung brennt das Metall ab. Die Metalldämpfe sperren den Zutritt von Sauerstoff und Stickstoff. Nach Abschalten des Schweißstroms erfolgt ein plötzliches Zusammenpressen beider Teile.

Gasschweißen (Autogenschweißen). Die Schweißwärme wird durch die Flamme eines Gemischs aus Brenngas (Äthin [Azetylen], Wasserstoff oder Stadtgas) und Sauerstoff erzeugt. Die verbreitetste Brennerart ist der *Injektor-* oder *Saugbrenner*. In ihm saugt der unter höherem Druck ausströmende Sauerstoff das Brenngas an und vermischt sich mit diesem. Entsprechend den zu schweißenden Werkstoffdicken haben die Brenner unterschiedlich große, auswechselbare

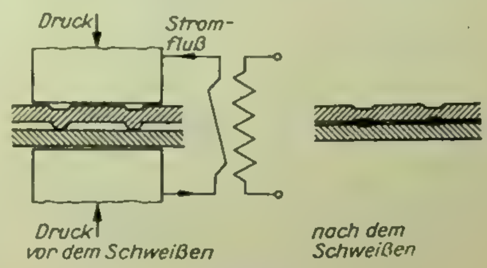


Abb. 8.4.2-7 *Buckelschweißen*

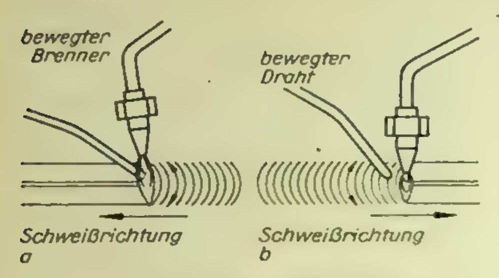


Abb. 8.4.2-8 Gasschmelzschweißen: a Nach-links-Schweißen, b Nach-rechts-Schweißen

Düsen. Sauerstoff und Brenngas stehen auch in Stahlflaschen gefüllt zur Verfügung. Aus Sicherheitsgründen wird Äthin (Azetylen) in Azeton bei einem maximalen Flaschendruck von 1,5 MPa gelöst. Der Sauerstoffflaschendruck beträgt 15 MPa. Der erforderliche Schweißdruck (Äthin [Azetylen] 10 bis 50 kPa, Sauerstoff 250 bis 300 kPa) wird durch *Druckminderventile* eingestellt. Bei der „*Nach-links-Schweißung*" bleibt der Zusatzdraht ruhig und der Brenner wird bewegt, bei der „*Nach-rechts-Schweißung*" ist es umgekehrt (Abb. 8.4.2-8). Sind die Verbindungskanten aufgebördelt, kann auch ohne Zusatzwerkstoff geschweißt werden. Das Gasschweißen wird im Rohrleitungsbau und für dünne Bleche angewendet.

Aluminothermisches (AT-)Schweißen (*Thermitschweißen*). Thermit, ein Gemisch aus Aluminiumgrieß und Eisenoxid, wird in einem feuerfesten Tiegel durch Initialzündung (Entzündungstemperatur ≈ 1300 °C) zur Reaktion gebracht. Die Reaktion verläuft exotherm (≈ 2500 °C); der flüssige Stahl fließt in die Schweißfuge und schmilzt die Werkstückflanken auf. Die nachfließende Schlacke schützt die Schweißstelle und wird nach dem Erkalten abgeschlagen. Das Verfahren wird hauptsächlich zum Verbinden von Schienen und Bewehrungsstählen eingesetzt.

Sonderschweißverfahren. Im *Kaltpreßschweißen* können ohne Wärmezufuhr Metalle durch hohe Preßkraft und der dabei auftretenden plastischen Verformung geschweißt werden. Die Werkstückoberflächen müssen sauber und eben sein. Die wichtigsten Ausführungsformen entsprechen denen des Widerstandsschweißens. Das *Stumpf- und Punktschweißen* wird vornehmlich in der Elektroindustrie angewendet. Das *Nahtschweißen* eignet sich für Behälter, Rohre und Kastenprofile sowie für Verpackungen.

Ultraschallschweißen. Dabei werden sich überlappende metallische Werkstücke verbunden, bei dem eines der beiden Teile unter Zusammendrücken in Ultraschallschwingungen versetzt wird. Die Reibungswärme führt zum Verschweißen. Auf diese Weise werden z. B. schwer schweißbare Metalle, wie Zirkon, Platin, Titan usw., verbunden.

Reibungsschweißen wird bei zylindrischen Teilen angewendet. Das rotierende Werkstück wird gegen ein feststehendes gedrückt, so auf Schweißtemperatur gebracht und dann durch plötzliches Abbremsen und kräftiges Stauchen verbunden. Das Verfahren wird u. a. zur Instandsetzung von Werkzeugen, Spindeln, Wellen und für Rohranschlüsse benutzt.

Diffusionsschweißen. Bei diesem Verfahren werden die Teile im Vakuum durch Induktion erwärmt und aufeinander gedrückt. An den Kontaktstellen, den Rauhigkeitsspitzen, erfolgt die Verbindung durch Diffusion der Atome. Das Verfahren wird dort angewendet, wo andere nicht wirksam und sehr enge Toleranzen einzuhalten sind. Nachteilig ist die lange Diffusionszeit.

Das *Elektronenstrahlschweißen* erfolgt mit einem im Hochvakuum erzeugten, stark gebündelten Elektronenstrahl. Die hohe Energiedichte ($> 10^7$ W/cm^2) ermöglicht das Verschweißen hochschmelzender Werkstoffe, wie sie im Raketen- und Reaktorbau verwendet werden. Zur Aufwandsverringerung sind Anlagen zum Schweißen in Atmosphäre und unter Schutzgas entwickelt worden. Der Elektronenstrahl kann auch zum Schneiden (*Präzisionsfräsen*) verwendet werden.

Laserschweißen. Durch die starke Bündelung des Laserstrahls (vgl. 12.3.4.) sind Energiedichten bis $\approx 10^{14}$ W/cm^2 möglich. Der geringe Brennfleckdurchmesser bis zu ≈ 1 µm ermöglicht Präzisionsschweißungen, z. B. bei der Fertigung elektronischer Bauelemente bzw. Verbindungen hochschmelzender Werkstoffe.

Explosivschweißen (*Sprengschweißen*). Bei diesem Verfahren treten Geschwindigkeiten von 400 bis 900 m/s und Drücke von 1 bis 100 MPa auf. Der zwischen aufgetragenem und Grundwerkstoff notwendige Öffnungswinkel liegt zwischen 1 und 50°. Die Anwendung des Verfahrens beschränkt sich auf großflächige Teile und ermöglicht das Aufplattieren von Aluminium, Kupfer, Nickel, hochschmelzender und metallkeramischer Werkstoffe und Plaste. Haupteinsatzgebiete sind der Reaktor- und chemische Apparatebau.

8.4.3. Löten

Löten ist das stoffschlüssige Verbinden metallischer Teile unter Verwendung eines geschmolzenen Zusatzmetalls, dem *Lot*, wobei dessen Schmelztemperatur unter der des Grundwerkstoffs liegt. Bei Arbeitstemperaturen unter 450 °C wird von *Weichlöten* gesprochen, darüber von *Hartlöten*. Zur Benetzung des Grundwerkstoffs mit Lot muß die Lötstelle zuvor metallisch sauber sein, auf Arbeitstemperatur erwärmt und mit einem Flußmittel versehen

werden. Die mechanische Beanspruchung der Weichlötstellen ist gering, die Erwärmung darf 100°C nicht übersteigen. Dagegen entspricht die Festigkeit der Hartlötstelle auch bei höheren Temperaturbeanspruchungen fast der des Grundwerkstoffs. Der Lötspalt kann in Richtung des Lotwegs enger werden, nicht umgekehrt. Durch Kapillarkräfte wird das geschmolzene Lot in den Spalt gesogen.

Lote und Flußmittel. Als Lot für das Weichlöten von Schwermetallen wird meist eine Zinn-Blei-Legierung, das *Lötzinn*, benutzt. Flußmittel ist das *Lötwasser*, eine Zinkchlorid-Ammoniumchlorid-Verbindung, oder Kolophonium. Die Löttemperatur liegt zwischen 180 und 320°C. Hartlöten erfolgt mit Silberlot bei 500 bis 800°C, Messinglot bei 900°C oder Kupferlot bei 1 100°C, wobei Borverbindungen als Flußmittel dienen.

Lötwerkzeuge und -verfahren. Für das Weichlöten von Hand, das *Kolbenlöten*, wird vorwiegend ein elektrisch beheizter, kupferner Lötkolben verwendet. *Hartlöten* geschieht mit *Lötlampe*, *Löt-* oder *Schweißbrenner*. Bei Massenfertigung werden maschinelle Hartlötverfahren eingesetzt. *Ofenlöten* wird bei mit Lot und Flußmittel versehenen Werkstücken in elektrisch oder gasbeheizten Öfen ausgeführt. Die *Schutzgas-* bzw. *Grobvakuumlötung* kann ohne Flußmittel in entsprechenden Öfen vorgenommen werden. Beim *Flammenfeldlöten* durchlaufen die mit Lot und Flußmittel vorbereiteten Werkstücke ein Flammenfeld und werden danach abgekühlt. *Hart-* und *Weichtauchlöten* erfolgt durch Tauchen bereits in Lötposition gebrachter Teile in ein Lötbad. Für das *Widerstandslöten* werden die zuvor verzinnten Teile mit einem Flußmittel bestrichen, zusammen mit einem Lotstreifen zwischen 2 Elektroden gespannt und dann unter örtlicher Erwärmung zusammengedrückt. Bei der *Induktionslötung* bewirken hochfrequente Ströme über angepaßte *Induktoren* die Erwärmung der Lötstelle.

Schwallöten ist ein besonders in der Elektrotechnik, z. B. bei der Leiterplattenherstellung, angewendetes Verfahren, wobei die Verbindungsstellen mit einem Lötmittelschwall in Berührung gebracht werden.

8.4.4. Kleben

Die Haftung zwischen metallischen oder nichtmetallischen Fügeteilen und Kleber wird durch Adhäsionskräfte bewirkt. Beim Metallkleben steigt mit zunehmender Blechdicke und gleichbleibender Klebbreite die Belastbarkeit der Verbindung. Bei konstanter Blechdicke muß bei Belastungsanstieg der Überlappungsquerschnitt vergrößert werden. Die Oberflächen der zu klebenden Teile müssen frei von Fremdstoffschichten, wie Oxid, Schmutz, Fett, sein. Um gut zu benetzen, muß der Klebstoff eine geringere Oberflächenspannung besitzen als die Fügeteile. Neben Phenol- und Polyurethanharzen werden besonders kalt- und warmabbindende Epoxidharze eingesetzt. Der Vorteil der Klebeverbindung liegt in der Vereinigung zweier Stoffe ohne bzw. ohne größere thermische und mechanische Beanspruchung. Innere Spannungen und Gefügeveränderungen werden vermieden. Da Vorrichtungen notwendig sind, erfolgt eine rationelle Anwendung des Verfahrens vorzugsweise in der Großserienfertigung.

8.4.5. Nieten

Ein ungeschlagener Niet besteht aus *Schaft* und *Setzkopf*. Beim Vernieten liegt der Setzkopf im Gegenhalter, und der *Schließkopf* wird durch Stauchen des Schafts von Hand mit dem *Schellhammer*, maschinell mit dem Drucklufthammer und eingesetztem *Döpper*, geformt (Abb. 8.4.5-1). Die Bezeichnung des Niets richtet sich meist nach der Setzkopfform. Als Nietwerkstoffe werden Stahl, Kupfer, Messing und Leichtmetall verwendet. Der Niet und die zu verbindenden Teile sollen möglichst aus dem gleichen Grundwerkstoff bestehen, um Korrosion und ungleichmäßige Wärmedehnung zu vermeiden.

Warmnieten wird für Niete > 10 mm Durchmesser angewendet. Der Niet wird rotglühend in die Bohrung gesteckt und geschlagen. Beim Erkalten zieht er sich zusammen und preßt die verbundenen Teile aneinander. Dieses zeit- und materialaufwendige Verfahren wird heute bei den Hauptanwendungsgebieten Kessel-, Stahl- und Maschinenbau vielfach durch Schweißen ersetzt.

Kaltnieten wird für Nietdurchmesser < 10 mm angewendet. Speziell bei sog. Wegwerferzeugnissen, z. B. Elektroinstallationsmaterial, werden die aufwendigeren Schraubverbindungen durch das Kaltnieten verdrängt.

Blindnieten wird bei nur von einer Seite zugänglichen Teilen angewendet. Der Blindniet besteht aus dem äußeren Hohlteil und dem Innenteil

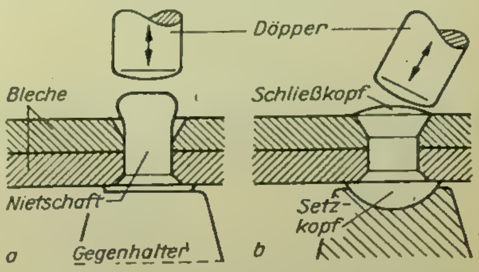


Abb. 8.4.5-1 Nietverbindung: a Anstauchen, b Fertigformen des Schließkopfs

(Abb. 8.4.5-2), die beide von einer Seite in das Nietloch eingesteckt werden. Mit einem Spezialwerkzeug wird der Kopf des Innenteils in das Hohlteil gezogen, wobei der Schließkopf entsteht. Das Innenteil reißt im Setzkopf ab. Beim *Sprengnieten* wird der Schließkopf durch eine von Wärme oder Schlag ausgelöste Detonation der im Schaft untergebrachten Sprengladung gebildet.

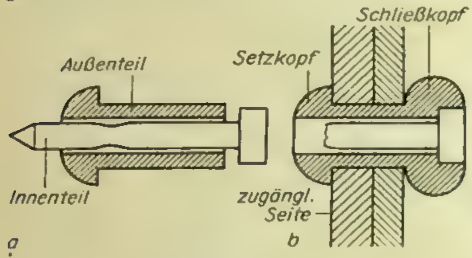


Abb. 8.4.5-2 Blindniet: a Aufbau, b eingezogen (vergrößert dargestellt)

8.4.6. Einpressen

Einpressen ist ein unlösbares Verbinden eines Innen- und eines Außenteils. Grundsätzlich wird beim Einpressen das äußere Maß des Innenteils etwas größer gehalten als das Innenmaß des Außenteils.

Längspressen stellt ein Fügen in Achsrichtung dar, wie *Einschlagen, Einpressen, Einschießen* und *Nageln*.

Querpressen ist ein Fügen zu verbindender Teile in radialer Richtung, wie *unterkühltes Einziehen, Aufschrumpfen* eines erwärmten Teils, *Klemmen* durch Zusammenbiegen des Außenteils oder *Aufspreizen* des inneren Teils und *Aufeinanderpressen* durch Klammern. Der Einsatz dieser Verfahren ist vielseitig und auch sehr ökonomisch.

8.4.7. Fügen durch Urformen

Ausgießen ermöglicht z. B. das Fügen von 2 Rohren, wobei der Raum zwischen Muffe und eingestecktem Rohrstück mit Blei oder einer Vergußmasse ausgefüllt wird.

Vergießen ist z. B. das Einbetten von Bauteilen der Elektrotechnik in Gießharz.

Schleuderguß dient der ökonomischen Fertigung von Gleitlagerschalen. Das flüssige Lagermetall, meist Bronze, wird durch die Zentrifugalkraft auf den Grundwerkstoff aufgebracht.

8.4.8. Fügen durch Umformen

In Abb. 8.4.8-1 sind einige wichtige Fügeverfahren dargestellt, die vorwiegend bei der Blechverarbeitung auftreten.

8.5. Fertigungshilfsstoffe

Hilfsstoffe sind Stoffe aller Aggregatzustände, deren Funktion in der Unterstützung eines Fertigungsverfahrens besteht und mit diesem selbst endet. Für die Be- und Verarbeitungsverfahren sind je nach Werkstoff, Fertigungsverfahren, Temperaturbedingungen, Folgeerscheinungen u. a. eine Vielzahl von Stoffkombinationen und -zubereitungen erforderlich, deren Wirkung über den Erfolg eines Produktionsprozesses entscheiden kann. Die Zuführung der Fertigungshilfsstoffe erfolgt meist über Umlaufsysteme mit Filtereinrichtungen. Vereinzelt, z. B. beim *Sprühkühlverfahren*, werden auch Sprühgeräte eingesetzt.

8.5.1. Fertigungshilfsstoffe für das Urformen

Beim Gießen sorgen *Formschlichten* für glatte Oberflächen der Gußteile. Dabei handelt es sich überwiegend um Zubereitungen mit Graphit.

Den Metallpulvern für Sinterprozesse werden zur Erleichterung des Pressens *Stearate* zugesetzt. Gleichzeitig wird dadurch das Porenvolumen des Werkstücks beeinflußt.

8.5.2. Fertigungshilfsstoffe für das Umformen

Bei den Warmverfahren Walzen, Pressen und Schmieden werden *Trenn-* und *Treibmittel* zur leichteren Entfernung der Werkstücke aus der

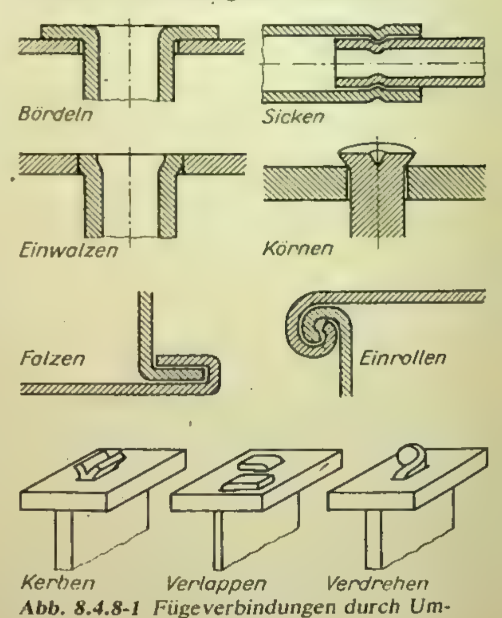


Abb. 8.4.8-1 Fügeverbindungen durch Umformen

Form und zur Standzeiterhöhung der Werkzeuge eingesetzt. Beim Warmwalzen von Stahlblech sind *Birkenreiser*, bei anderen Verfahren *Sägemehl*, Kombinationen von *Mineralöl mit Graphit* oder auch *Glas* der Hilfsstoff. Bei Aluminiumblechen verhindern *warmfeste Mineralöl-in-Wasser-Emulsionen* das Haften an den Walzen. Der größere Teil des Hilfsstoffbedarfs besteht bei der Kaltumformung, wo die Kräfte die Festigkeitswerte übertreffen und die Reibung vermindert werden muß. Je nach Werkstoff und Verfahren werden verschiedene Hilfsstoffe eingesetzt.

– Flüssigkeiten: Emulsionen (OW), fette Öle, Mineralöle, Kompoundöle, Suspensionen,
– Pasten: Emulsionen (WO), Fette, Seifen, Polymere, alle auch legiert mit Festkörpern,
– Festkörper: Kalk, Talkum, Eisenphosphat, Graphit, Molybdändisulfid, Metallstearate, Metalle.

8.5.3. Fertigungshilfsstoffe für das Spanen

Die spanbildenden Trennverfahren (vgl. 8.3.2.) beanspruchen die größte Menge an Hilfsstoffen. Die häufig erwartete Wirkung trug ihnen auch die nicht korrekte Bezeichnung *Kühl-* und *Schmiermittel* ein.

Gase werden zur Kühlwirkung bei geringer Verschmutzung und entfallender Rückführung in geringem Umfang genutzt. Der inerte Stickstoff, aber auch Kohlendioxid, Sauerstoff und Luft, sind unter Verzicht auf eine Schmierwirkung gebräuchlich.

Aerosole sind Kombinationen von Gas und Flüssigkeit (Nebel) oder Festkörpern (Staub). Sie erzielen bei geringer Schmierwirkung einen großen Kühleffekt.

Wäßrige Lösungen von Alkalien verbessern Benetzung und Korrosionsschutz vornehmlich beim Schleifen. Auch Natriumnitrit, Kaliumdichromat und Triäthanolamin werden verwendet. Durch Zusatz von Fettsäuren läßt sich ein leichter Schmiereffekt erreichen. Kupfer und vor allem Leichtmetalle sind jedoch alkaliempfindlich. Außergewöhnlich hohe Zerspanungsleistungen werden mit Lösungen von Schwermetallsalzen (Fluide) erreicht.

Emulsionen werden aus entsprechenden Zubereitungen – den *Emulsolen*, auch unkorrekt *Bohröle* genannt – durch Verdünnen mit Wasser hergestellt. Die eigentlichen Emulgatoren sind *Seifen* o. ä. wirkende *Tenside*. Sie werden in Mischung mit Mineralöl handelsüblich angeboten. Verbrauchte Emulsionen dürfen erst nach Abtrennung des Mineralölanteils ins Abwassernetz eingeleitet werden.

Fettöle sind tierischer oder pflanzlicher Herkunft und werden bei geringen Schnittgeschwindigkeiten und hohen Flächenpressungen am Werkzeug eingesetzt.

Mineralöle werden für die Zerspanung mit Schwefel-, Phosphor- oder Chlorverbindungen aktiviert und seltener mit Fettölen legiert. Man erreicht mit ihnen einen großen Schmiereffekt durch Reaktion mit der Oberfläche des bearbeiteten Metalls.

Suspensionen aus Mineralölen mit Festkörperschmierstoffen, wie Graphit, Molybdändisulfid, Talk u. a., werden nur in Sonderfällen eingesetzt, z. B. beim Gewindeschneiden.

8.5.4. Sonstige Fertigungshilfsstoffe

Abtragen. Zum Elysieren wird eine Salzlösung als Elektrolyt und bei der Elektroerosion ein dünnflüssiger Kohlenwasserstoff als Dielektrikum angewendet.

Veredeln. Das Anlassen und Härten von Stahl (vgl. 3.1.1.) verlangt entsprechende Abkühlmedien, wie Wasser, wäßrige Lösungen von Salzen oder hochmolekularen Stoffen und Mineralöle verschiedener Viskosität. Bei den aushärtbaren Leichtmetallegierungen werden Salzschmelzen zum Lösungsglühen eingesetzt.

Fügen. Vornehmlich für die Schmelzverbindungen Löten und Schweißen werden Fluß- und Desoxydationsmittel angewendet. Beim Löten sind Lötfett mit Salmiak- oder Kolophoniumgehalt, verdünnte Salzsäure, Borax, Borsäure und Natriumphosphat üblich, während für Schweißverfahren Schlackenbildner aus Silikaten und Flußspat neben den Schutzgasen verwendet werden.

8.6. Vorrichtungen und Spannzeuge

Vorrichtungen sind technische Einrichtungen, die die für die Bearbeitung notwendige Zuordnung von Maschine, Werkstück und Werkzeug bewirken. Zu ihnen gehören die *Werkzeug-* und die *Werkstückspanner*, aber auch Einrichtungen zum Bewegen der Werkstücke u. a. Zusatzeinrichtungen. Vorrichtungen erhöhen die Genauigkeit der Bearbeitung. Sie sind oftmals notwendige Ergänzungen zu den Maschinen, um die Arbeitsgänge wirtschaftlicher, leichter und sicherer zu gestalten und den Austauschbau zu sichern. Sie tragen damit wesentlich zur Steigerung der Arbeitsproduktivität und Verbesserung der Arbeitsbedingungen bei. Vorrichtungen auf Maschinen spezialisieren i. allg. auf eine bestimmte Fertigungsaufgabe, während Einrichtungen, wie Zubehör, Sonderzubehör, zur Arbeitsbereichserweiterung dienen.

8.6.1. Werkzeugspanner

Werkzeugspanner nehmen das Werkzeug auf, justieren es und spannen es fest gegen die Bearbeitungskräfte. Typische Vertreter sind *Bohrfutter*, wie sie von Handbohrmaschinen bekannt sind, *Stahlhalter* für Drehmaschinen oder *Messerköpfe* von Fräsmaschinen. Zur Einsparung von Hilfszeit sind sie oft als *Schnellwechselhalter* ausgebildet. Es gibt Werkzeugspanner für nur ein Werkzeug, für mehrere (*Mehrstahlhalter*) oder mit einem Stellbereich für viele Werkzeuge, z. B. Bohrfutter für 1 bis 10 mm Bohrerdurchmesser. Vielschneidige Werkzeuge werden oft außerhalb der Maschine eingerichtet und komplett mit einem Schnellwechselhalter gespannt.

8.6.2. Werkstückspanner

Werkstückspanner justieren das Werkstück in der Maschine und halten es fest gegen die Bearbeitungskräfte.
Drehfutter (Abb. 8.6.2-1) sind als *Mehrbackenfutter* ausgebildet und haben einen großen Verstellbereich zur Anpassung an die verschiedenen Werkstückdurchmesser. Die Spannbacken werden durch ein Getriebe synchron zugestellt.
Spannzangen (Abb. 8.6.2-2) haben einen kleinen Stellbereich, justieren jedoch genauer. Zur Innenaufnahme werden *Spanndorne* verwendet, die in der Bohrung gespreizt werden.
Vorrichtungen. Flache (prismatische) Teile werden außer in *Schraubstöcken* oder auf *Magnetspannplatten* in speziellen Werkstückspannern gehalten, die im Sprachgebrauch kurz als „Vorrichtungen" bezeichnet werden. Es sind werkstückgebundene Einrichtungen, die zum Positionieren, Spannen und Führen eines bestimmten Werkstücks eingerichtet werden. Sie können als Ein- oder Mehrspanneinrichtung angelegt sein. Um eine Wiederverwendbarkeit beim Umrüsten der Maschinen auf ein anderes Werkstück zu ermöglichen, wurde ein *Vorrichtungsbaukasten* entwickelt, der aus einzelnen Funktionselementen, wie z. B. Grundplatten, Aufnahmebolzen, Spanneisen und -zylindern, besteht. Aus solchen Teilen wird eine nach Gebrauch wieder demontierbare Vorrichtung (Abb. 8.6.2-3) zusammengesetzt. Es gibt zentrale Ausleihstationen für solche Bauteile. Vorrichtungen finden besonders für Bohr- und Fräsarbeiten Verwendung.

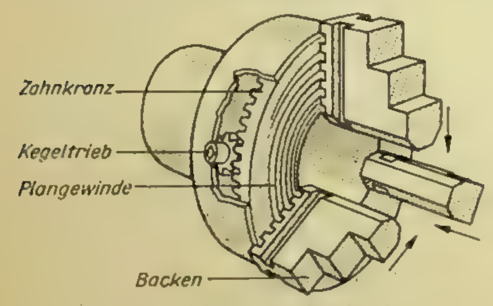


Abb. 8.6.2-1 Drehfutter (Dreibackenfutter)

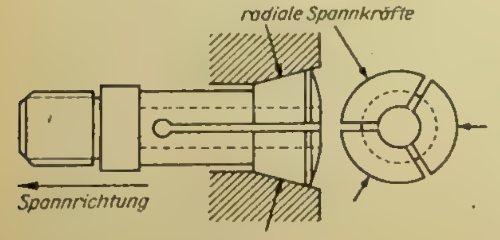


Abb. 8.6.2-2 Spannzange

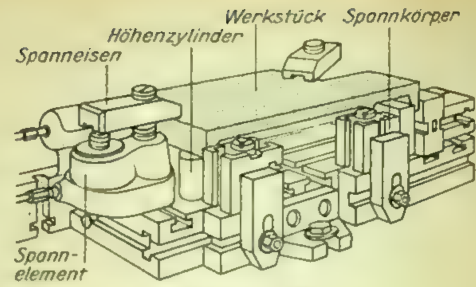


Abb. 8.6.2-3 Baukastenvorrichtung

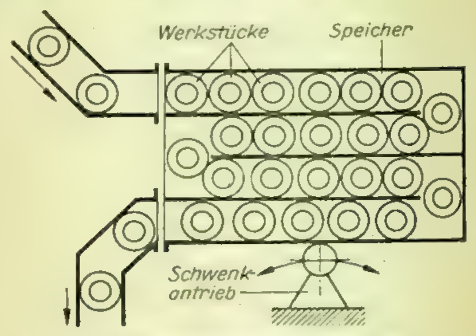


Abb. 8.6.4-1 Speichermagazin (geordnet)

8.6.3. Zusatzeinrichtungen

Für die Bearbeitung mehrerer Flächen oder auf mehreren Stationen werden weitere Einrichtungen verwendet. Dazu gehören *Längs-*, *Rund-*, *Schalt-* und *Schwenktische* (vgl. Abb. 8.9.2-2) sowie *Teilvorrichtungen*. Sie übernehmen kontinuierlich oder taktweise den Transport der in die Vorrichtung gespannten Werkstücke auf der Maschine oder führen eine zusätzliche Arbeitsbewegung aus, z. B. zum Rundfräsen.
Zusatzeinrichtungen sind auch *Meß-* und *Kontrollvorrichtungen* für die Überwachung des

Fertigungsablaufs und der Qualität der Fertigung sowie *Schutzvorrichtungen* für den Bedienenden an bewegten Maschinenteilen oder Werkzeugen, wie Schutzhauben um Schleifkörper oder Riemenschutz bei Antrieben.

8.6.4. Einrichtungen zur Werkstückbewegung

Während Zusatzeinrichtungen den inneren Werkstückfluß übernehmen können, wird der äußere Werkstückfluß mit den Funktionen Zu- und Abführen, Weitergeben oder Speichern von Einrichtungen übernommen, die als *Förder-* und *Speicher-* oder *Verkettungseinrichtungen* bekannt sind.

Speicher können ausgebildet sein als ***Bunker*** für ungeordnetes Stückgut, wie Schrauben, als *Magazine* für bereits geordnete Werkstücke, wie Wälzlagerringe (Abb. 8.6.4-1), als *Stapler* oder *Haspeln* und *Abrollkörbe*, beispielsweise für Drähte und Bänder.

Fördereinrichtungen können ausgebildet sein als *Rollenbahnen*, *Bänder*, Schienen, *Elevatoren*, Schalttische, Schwenkarme und *Greifer*. Sie arbeiten stetig oder taktweise nach Abruf.

In Abb. 8.6.4-2 entnimmt ein Greifer einem Kettenmagazin an einer Entnahmestation ein Werkstück und fährt es mit dem Greiferwagen zur Bearbeitungsstation. Das fertig bearbeitete Werkstück bringt der Greiferwagen zu einem 2. Magazin. Die Zahl der Speicherplätze im Rohteil- und Fertigteilmagazin bestimmt den Füll- bzw. Leerungsrhythmus.

8.7. Stoffeigenschaftsändern

Unter *Stoffeigenschaftsändern* versteht man Behandlungen der metallischen Werkstoffe zur Änderung natürlicher oder bei der Verarbeitung

entstandener Eigenschaften. Ziel der Eigenschaftsänderung ist die Erfüllung funktionsbedingter Anforderungen der aus den Werkstoffen hergestellten Halbzeuge oder Fertigerzeugnisse durch Änderung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften. Diese Änderung wird bewirkt durch den Wechsel der Phasen im Gefüge der Festkörper.

Wärmebehandlung ist die Sammelbezeichnung für Fertigungsverfahren zur Behandlung metallischer Werkstoffe im festen Zustand durch thermische, chemisch-thermische oder mechanisch-thermische Einwirkung zur Verbesserung oder Erreichung bestimmter Verarbeitungs- und/oder Gebrauchseigenschaften durch Stoffeigenschaftsänderung.

8.7.1. Grundlagen und Grundbegriffe

Eine wissenschaftliche Grundlage der Wärmebehandlung ist das *E*isen-*K*ohlenstoff-*D*iagramm (*EKD*, Abb. 8.7.1-1).

Durch wissenschaftliche Untersuchungen ist das Verhalten der metallischen Werkstoffe beim Erwärmen und Abkühlen bekannt. Ihr Verhalten bei Temperaturänderung ohne oder mit chemischer bzw. mechanischer Beeinflussung führte zu zahlreichen Wärmebehandlungsverfahren.

Erwärmen ist das Erhöhen der Temperatur.

Vorwärmen ist das langsame, eventuell stufenweise Erwärmen auf eine Temperatur unterhalb der beabsichtigten Behandlungstemperatur, um dem Verziehen und/oder der Spannungsrißbildung vorzubeugen.

Hochwärmen ist das Erwärmen bis zum Erreichen der Solltemperatur an der Oberfläche.

Durchwärmen ist der Temperaturausgleich bei Solltemperatur zwischen Oberfläche und Kern.

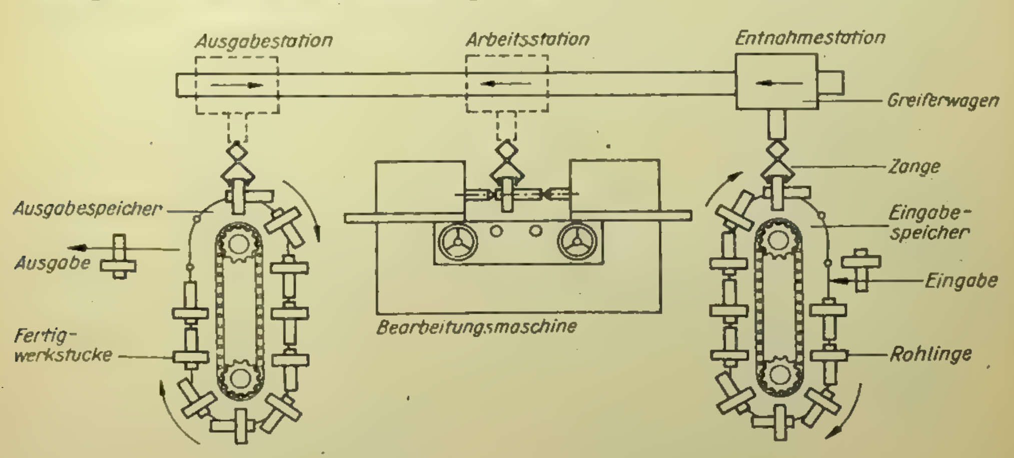


***Abb. 8.6.4-2** Fördereinrichtung mit Speicher*

Halten ist das Beibehalten einer konstanten Temperatur nach erfolgtem Durchwärmen über eine bestimmte Zeitdauer, die zum Ablauf physikalischer und/oder physikalisch-chemischer Prozesse notwendig ist. *Abkühlen* ist das Verringern der Temperatur.

8.7.2. Industriell bedeutende Wärmebehandlungsverfahren

Glühverfahren. *Spannungsarmglühen.* Spannungen im Werkstück können zum Verziehen, zur Maßänderung, zur Rißbildung oder zum Bruch führen. Das Entstehen von Spannungen ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Sie können durch das Gießen, Warm- und Kaltumformen, Schweißen, die spanende Bearbeitung und durch Schleifen entstehen. Durch eine Glühbehandlung können diese schädlichen inneren Spannungen vermindert werden. Die Glühtemperaturen liegen je nach Stahlart im Bereich von 530 bis 650 °C (Abb. 8.7.2-1). Die Spannungsverminderung gelingt nur, wenn das Erwärmen und Abkühlen sehr langsam erfolgen. Beim Spannungsarmglühen finden keine Gefügeumwandlungen statt.

Weichglühen. Weichgeglüht werden vor allem Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt > 0,5 %. Sie lassen sich nach dieser Glühung gut bearbeiten, und das Gefüge, körniger Zementit, ist ein günstiges Ausgangsgefüge für eine spätere Härtung.

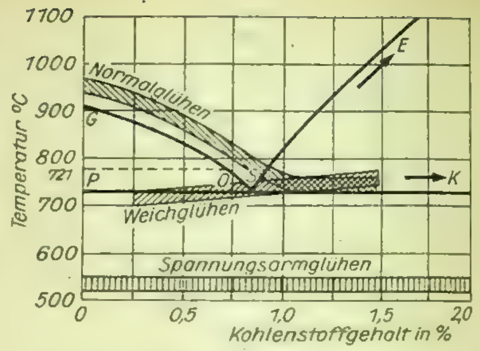


Abb. 8.7.2-1 Wichtige Glühbereiche für Stahl

Die Behandlung erfolgt im Temperaturbereich der Linie *PSK* in Abb. 8.7.2-1.

Normalglühen beseitigt Ungleichmäßigkeiten im Gefüge, die durch Warm- und Kaltverformung entstanden sind. Es bewirkt Kornverfeinerung und Spannungsminderung. Normalgeglüht werden vorrangig Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt < 0,5 %. Für eine vollständige Umwandlungsglühung liegt der anzuwendende Temperaturbereich oberhalb der Linie *GOS* in der Abb. 8.7.2-1. Für Stähle mit Kohlenstoffgehalten > 0,85 % überdecken sich die Glühbereiche. Bei den relativ hohen Normalglühtemperaturen ist ein zu langes Halten zu vermeiden, weil dadurch Kornwachstum einsetzt. Das Abkühlen von Glühtemperatur erfolgt langsam und gleichmäßig, für unlegierte Stähle an ruhender Luft, für legierte Stähle bis 500 °C im Ofen und erst dann an ruhender Luft.

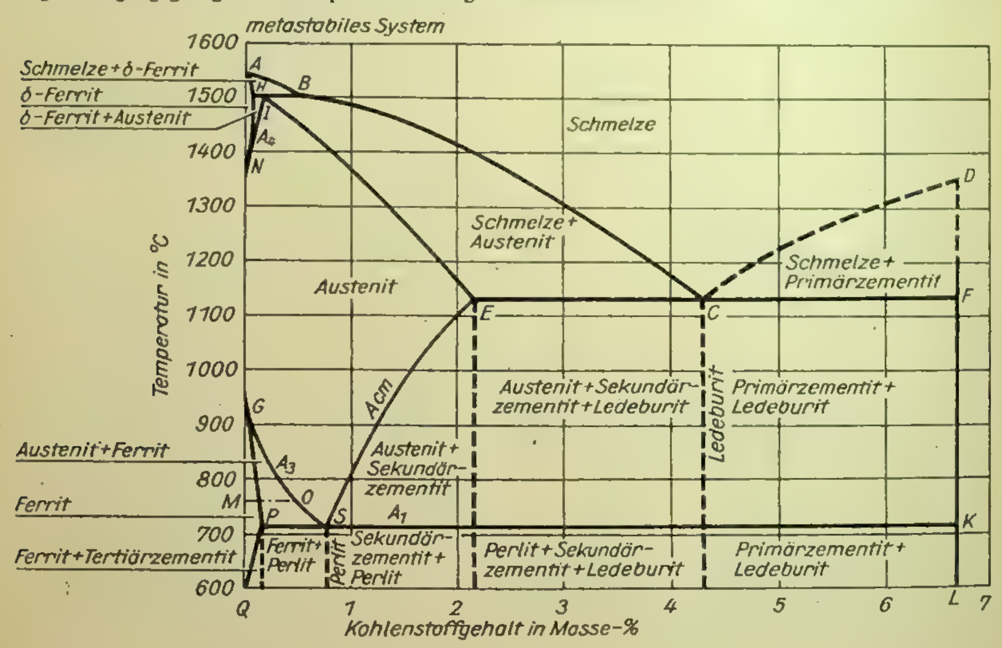


Abb. 8.7.1-1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Blankglühen ist ein Glühen im Vakuum oder unter Schutzgas und verhindert das Oxydieren der Oberfläche des Glühguts. Damit wird ein nachträgliches Entzundern überflüssig. Auf diese Weise behandelt man Drähte, Bleche und gezogene Profile.

Thermische Härteverfahren. ***Härten nach Volumenerwärmung.*** Die Härtbarkeit der Stähle ist eine Eigenschaft von besonderer industrieller Bedeutung. Wird ein Werkstück über den ganzen Querschnitt erwärmt, spricht man von *Volumenerwärmung*.

Durch Erwärmen auf Härtetemperatur bildet sich das Gefüge *Austenit*. Erfolgt daran anschließend ein schnelles Abkühlen, entsteht das Härtegefüge *Martensit* (Abb. 8.7.2-2). Kohlenstoffgehalt und Legierungselemente beeinflussen die erreichbare Härte und Zähigkeit.

Härten mit kontinuierlichem Abkühlen ist ein Härten, bei dem das Abkühlen in nur einem Abkühlmedium erfolgt. Früher wurden dafür die Begriffe *Abschreckhärten* oder *einfache Härtung* gebraucht.

Härten mit diskontinuierlichem Abkühlen ist ein Härten, bei dem das Abkühlen in verschiedenen Abkühlmedien unterschiedlicher Abkühlintensität erfolgt. Dafür waren früher die Begriffe *gebrochene Härtung* und *Warmbadhärtung* geläufig.

Thermisches Oberflächenhärten. Die Härtung beschränkt sich bei diesen Verfahren auf einen bestimmten Teil oder die gesamte Oberfläche eines Werkstücks. Es wird lediglich die Oberfläche erwärmt und abgekühlt; der Kern des Werkstücks und angrenzende, nicht erwärmte Abschnitte bleiben ungehärtet. Bestimmend für den Härteeffekt sind Stahlart und Oberflächenhärteverfahren.

Induktionshärten ist das induktive Erwärmen von Oberflächenpartien mit angepaßten Heizschleifen aus Kupferrohr, sog. Induktoren. Mit elektrischen Strömen und Arbeitsfrequenzen von 100 bis 2 500 kHz können Härteschichten bis 1,5 mm Dicke, mit Frequenzen von 0,5 bis 10 kHz Härteschichten von 1,5 bis 25 mm erzeugt werden (Abb. 8.7.2-3).

Flammenhärten erfolgt mit speziellen Härtebrennern, die mit einem Gas-Sauerstoff-Gemisch betrieben werden. Geeignete Gase sind Stadt-, Erdgas, Äthin (Azetylen) und Propan. Unmittelbar hinter dem Brenner wird das Werkstück mit einer Wasserbrause abgeschreckt. Erzielbar sind Einhärtetiefen von 1 bis 20 mm.

Tauchhärten ist die Verfahrensbezeichnung für ein Oberflächenhärten durch kurzzeitiges Eintauchen des gesamten Werkstücks oder der zu härtenden Partie in ein Salz- oder Metallbad von $\approx 10^3$ °C. Die Härtetiefe kann nur über die Tauchzeit gesteuert werden. Das Verfahren erreicht nicht das technische Niveau der Flammen- oder Induktionshärtung.

Chemisch-thermische Härteverfahren. Bei diesen Verfahren wird die chemische Zusammensetzung der Oberfläche des Stahls durch thermische und chemische Einwirkungen verändert und damit ein hoher Verschleißwiderstand erzeugt.

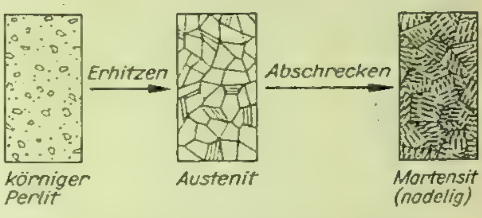


Abb. 8.7.2-2 Die Entstehung des Härtegefüges Martensit

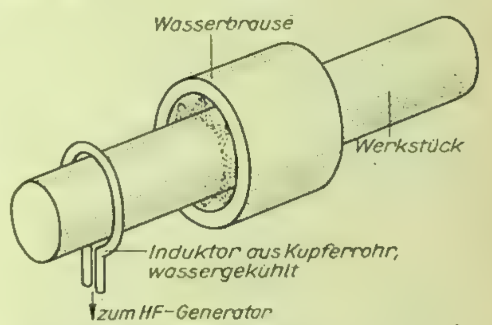


Abb. 8.7.2-3 Induktionshärten einer Welle

Einsatzhärten ist ein Oberflächenhärten von Einsatzstählen durch Verbindung von Aufkohlen der Werkstückoberfläche mit Volumenerwärmung. Durch das Aufkohlen wird der Kohlenstoffgehalt der Einsatzstähle von 0,2 %, in der Randzone auf 0,8 % erhöht und damit die Voraussetzung zur Bildung einer harten Oberflächenschicht geschaffen. Das Aufkohlen kann in Kohlenstoff abgebenden Medien, wie Pulver (*Pulveraufkohlen*), Paste (*Pastenaufkohlen*), Salz (*Salzbadaufkohlen*) und Gas (*Gasaufkohlen*) durchgeführt werden. Die erzielbaren Schichtdicken liegen bei 0,05 bis 2 mm.

Direkthärten wird bei Aufkohlungstemperatur ohne nochmalige Erwärmung durchgeführt. Beim *Randhärten* wird das Werkstück nach dem Aufkohlen auf eine Härtetemperatur erwärmt, die dem mit Kohlenstoff angereicherten Rand angepaßt ist. Beim *Kernhärten* wird das Werkstück nach dem Aufkohlen auf eine Härtetemperatur erwärmt, die dem niedrigen Kohlenstoffgehalt des Kernwerkstoffs angepaßt ist.

Nitrieren ist eine Wärmebehandlung bei 500 bis 560 °C im Ammoniakstrom oder im Salzbad (*Gas-* oder *Badnitrieren*). Der Stickstoff diffundiert zwischen 0,01 und 0,6 mm tief. Beim *Karbonitrieren* diffundieren gleichzeitig Kohlenstoff- und Stickstoffatome in die Werkstückoberfläche. Die Verfahrenstemperaturen sind niedriger als beim Einsatzhärten.

Metalldiffusionsverfahren erzeugen harte, verschleißfeste Schichten durch Anreichern der Werkstückoberfläche mit Atomen anderer Metalle, z. B. Chrom und Titan. Wird außerdem noch Kohlenstoff zugeführt, handelt es sich um ein Metall-Nichtmetall-Diffusionsverfahren, z. B. *Chromkarbid-* oder *Titankarbidbehandlung.*

Anlassen. Die Anlaßtemperatur für Einsatzstähle beträgt 180 bis 240 °C, für Vergütungsstähle 530 bis 670 °C und für Werkzeugstähle 200 bis 500 °C.

Vergüten ist eine Verfahrenskombination aus Härten und Anlassen zur Erzielung erhöhter Festigkeit gegenüber dem Glühzustand bei guten Zähigkeitseigenschaften.

Zwischenstufenvergüten. Hierbei wird nicht das Härtegefüge Martensit angestrebt, sondern die Abkühlung so gelenkt, daß sich ein Zwischenstufengefüge bildet. Ein Anlassen erfolgt dann nicht.

Wärmebehandlung von Gußeisen. Auch Gußeisen kann durch *Spannungsarmglühen* zwischen 500 und 600 °C, *Weichglühen* zwischen 820 und 900 °C und *Vergüten*, einem Härten im Ölbad verbunden mit hohem Anlassen, in seinen Eigenschaften verbessert werden.

Bei Gußeisen mit 0,5 bis 0,8 % gebundenem Kohlenstoff, perlitischem Gefüge und feinen Graphitlamellen kann auch die Oberfläche gehärtet werden. Am bekanntesten ist diese Verfahrenstechnik durch das Flammen- oder Induktionshärten von Führungsbahnen an Werkzeugmaschinen. Diese Oberflächenhärteverfahren eignen sich auch für Temperguß, wobei der weiße Temperguß vorher bearbeitet sein muß.

Wärmebehandlung von Nichteisenmetallen. Bei den NE-Metallen ist von industrieller Bedeutung das Aushärten und Homogenisierungsglühen (Abb. 8.7.2-4). Wird eine Aluminium-Kupfer-Legierung mit 4 % Cu auf 520 °C erwärmt und anschließend langsam abgekühlt, so scheidet sich

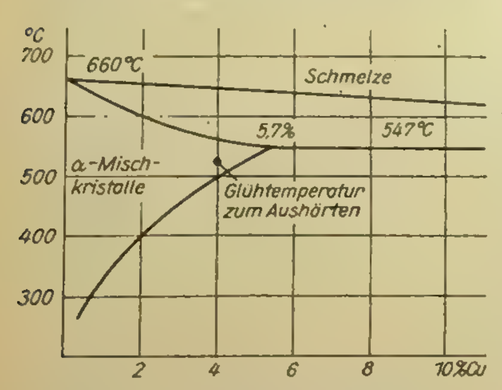


***Abb. 8.7.2-4** Ausschnitt aus einem Zustandsdiagramm einer Aluminium-Kupfer-Legierung*

im Gefüge die Kristallart Al_2Cu aus. Wird von der Glühtemperatur abgeschreckt, bleiben die Mischkristalle in übersättigter Form erhalten. Beim anschließenden Anlassen über 100 °C findet eine Umlagerung der Atome statt, wodurch erhöhte Festigkeit bei guter Dehnung entsteht. Die ganze Behandlung nennt man *Aushärten*. Für das Anlassen wird auch der Ausdruck *Warmauslagern* gebraucht. Bei Legierungen, die bei Raumtemperatur aushärten, spricht man vom *Kaltauslagern*. Das Aushärten ist vor allem bei Leichtmetallen und bei Berylliumbronze üblich.

8.8. Beschichten und Oberflächenumwandlung

Verschleiß und Korrosion der metallischen Werkstoffe lassen sich durch eine entsprechende Oberflächenbehandlung wesentlich mindern. Gleichzeitig ist für nahezu alle festen Werkstoffe auch eine Kennzeichnung und verbessertes Aussehen zu erreichen.

8.8.1. Korrosionsschutz

Trotz bisheriger Schutzmaßnahmen werden ≈ 3 % der Rohstahlerzeugung als Korrosionsverlust geschätzt. Absolut sind das für die DDR ≈ 200 000 t/Jahr oder die Produktion von 12 Werktagen unserer Stahlwerke.

Die Metalle kommen fast nur in Form ihrer in den Erzen bestehenden Verbindungen, z. B. als Oxide, Sulfide usw., vor. Aus ihnen werden sie mit erheblichen Energiemengen gewonnen (vgl. 3.2., 3.3.). Diese Zwangsstruktur wollen sie wieder unter Annahme einer energieärmeren Verbindung verlassen. Die Rückbildung in den Ausgangszustand durch begünstigende Einflüsse der Umgebung – chemische und elektrochemische – bezeichnet man als *Korrosion*.

Chemische Korrosion wird durch aggressive Gase und Dämpfe sowie hohe Temperaturen ausgelöst, z. B. das Schwarzwerden des Silbers durch Bildung von Silbersulfid mit dem in der Atmosphäre befindlichen Schwefel oder die Zunderbildung beim Glühen von Stahl durch Reaktion mit dem Luftsauerstoff.

Elektrochemische Korrosion ist die am häufigsten auftretende Art. Durch eine elektrisch leitende Flüssigkeit (auch in der Atmosphäre) – einen Elektrolyten – wird der Austausch von Metallionen bewirkt. Bekannte Erscheinungsformen sind bei Eisen der Rost, bei Kupfer die Patina und beim Aluminium das Aluminiumoxid (Korund).

Die *elektrochemische Spannungsreihe* der Metalle erklärt die meisten Korrosionsschäden und die Wirksamkeit von Schutzmethoden. Der Ionenaustausch muß entweder verhindert oder in

gewünschter Richtung beeinflußt werden. Das erfolgt durch Legieren mit beständigeren Komponenten oder Beschichten mit edleren oder weit unedleren Metallen. Bei letzterem nutzt man die Eigenschaft einiger Metalle, feste und undurchlässige Korrosionsschichten zu bilden, die den Fortgang eines korrosiven Angriffs unterbinden. Im einfachsten Falle werden organische oder anorganische Schichten aufgetragen, damit sich kein galvanisches System bilden kann.

8.8.2. Katodenschutz

Im galvanischen System wird stets die Anode angegriffen und aufgelöst. Daraus leitet sich eine wirksame Schutzmethode für in Elektrolyte eingebettete metallische Gegenstände ab, z. B. Schiffskörper im Wasser oder Rohrleitungen (vgl. Abb. 2.4.2-1) und Behälter im feuchten Erdreich. Diese überwiegend aus Stahl bestehenden Gegenstände können in ihrer gesamten Oberfläche zur unlöslichen Elektrode – zur Katode – mit Hilfe von sog. *Schutz-* oder *Opferanoden* gemacht werden. Die Opferanoden bestehen aus einem Metall mit niedrigerem (unedlerem) Potential, bei Eisen also aus Magnesium oder Zink. Sie werden mit dem Schutzobjekt leitend verbunden und korrodieren „für" dieses. Die Opferanode muß nach einer gewissen Zeit ersetzt werden (Abb. 8.8.2-1).

Bei großer Potentialdifferenz und auch während der Trockenperioden vorhandenem Elektrolyten ergibt sich durch die Auflösung der Opferanode ein ausreichender Schutzstrom. Bei stark wechselnder Leitfähigkeit und erschwerter Auswechslung der Anoden kann durch Fremdspannung aus dem Netz (Gleichstrom) das zu schützende Objekt zur Katode gemacht werden. Die Anode besteht dann aus einem gut leitenden unlöslichen Werkstoff, z. B. Graphit. Je nach Leitfähigkeit im Schutzsystem werden 1 bis 20 V angelegt, damit eine durchschnittliche Stromdichte von 10 bis 200 mA/m^2 auftritt. Der Katodenschutz wird häufig in Kombination mit organischen Deckschichten angewendet.

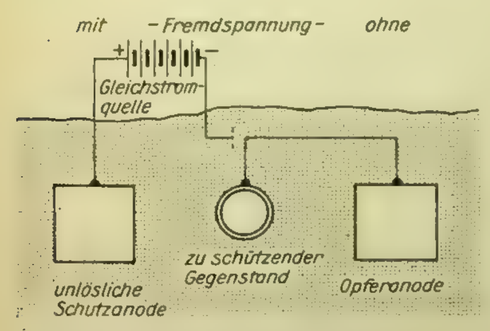


Abb. 8.8.2-1 Katodenschutzprinzip mit und ohne Fremdspannung

8.8.3. Temporärer Korrosionsschutz

Der zeitweilige oder vorübergehende Schutz wird für Halbzeuge und Werkstücke genutzt, die erst nach einer Lager- und Transportzeit weiterverwendet werden und in ihrer Funktion keinen oder einen anderen Schutz aufweisen müssen. Die Werkstücke werden nach der Bearbeitung häufig mit *Korrosionsschutzöl* oder *-fett* behandelt. Die wäßrigen Medien (Emulsionen, Lösungen) der Fertigungshilfsstoffe wirken nur während der Bearbeitung und kurze Zeit danach. Mit Trocknung und möglicher Wiederbefeuchtung sind Korrosionen zu erwarten. Deshalb muß oft schnell getrocknet und konserviert werden. Mit „*Dewatering Fluids*" kann Trocknen und Konservieren in einem Arbeitsgang erfolgen. Es handelt sich um besonders zubereitete Kohlenwasserstoffe (Öle), die unter Wasserentfernung die Metalloberfläche benetzen.

Bei der Blechumformung haben sich Fertigungshilfsstoffe, die gleichzeitig Korrosionsschutzmittel sind, bewährt. Sie werden bereits im Walzwerk aufgebracht und begleiten das Material bis zur fertigen Form. Damit werden mehrere aufwendige Arbeitsgänge eingespart und leichtes Entfernen vor dem Anstrich gesichert.

Für Lagerung und Versand gibt es außer den pastösen und flüssigen Korrosionsschutzmitteln noch sog. *Dampfphaseninhibitoren* (*DPI*). Meist ist das Verpackungspapier schon mit der pulvrigen chemischen Verbindung (Dizyklohexylaminnitrit) imprägniert, die bei Raumtemperatur sublimiert und das Werkstück schützt.

Plasttauchmassen bilden einen starken Überzug, der gleichzeitig mechanische Beschädigungen des Werkstücks verhindert und durch Abreißen entfernt werden kann.

8.8.4. Oberflächenvorbehandlung

Die verschiedensten permanenten Deckschichten für Korrosions- und Verschleißschutz oder dekoratives Aussehen verlangen in der Regel eine sorgfältige Oberflächenvorbehandlung und häufig auch -nachbehandlung. Die metallisch saubere Oberfläche ist Voraussetzung für haltbares Beschichten oder eine Oberflächenumwandlung. Die Art des Werkstoffs und die der Verunreinigungen bestimmen das geeignete Verfahren.

Mechanische Verfahren. *Aufschleudern* von Korund oder Stahlkies durch Druckluft oder Zentrifugalkraft, *Sandstrahlen*, *Schleifen*, *Polieren*, *Trommeln*, *Wasserstrahlen*, *Bürsten*, *Hämmern* sind eine Auswahl der gebräuchlichsten Verfahren.

Chemische und elektrolytische Verfahren. *Entfetten* erfolgt mit organischen Lösungsmitteln

(Tri-, Perchloräthylen, Benzin usw.) und Behandlung in *heißen alkalischen Bädern* sowie durch *Emulsions-* und *elektrolytisches Entfetten*. Die Reinigungsbäder werden durch starke Bewegung der Flüssigkeit mittels Pumpen oder Ultraschall wirksamer. Ferner gehört in diese Gruppe das *Dekapieren* und *Beizen* mit Säure oder Alkalien, *elektrolytisches Polieren* und *Entgraten*, *chemisches Polieren* und *Entmetallisieren*, letzteres zur Entfernung von abgenutzten oder fehlerhaften Metallüberzügen.
Bei allen chemischen Verfahren ist die Werkstoffart zu berücksichtigen. Zinn, Zink, Blei und deren Legierungen sind wie Aluminium stark alkaliempfindlich, Magnesium ist von Wasser und Salzen angreifbar, Eisen und Stahl lassen sich in heißen alkalischen Lösungen gut entfetten. Zur Entfernung von Oxidschichten wird verdünnte Schwefel- oder Salzsäure verwendet. Diese Behandlung wird je nach Säurekonzentration und Werkstoff als *Dekapieren*, *Beizen* oder *Brennen* bezeichnet. *Inhibitoren* schützen das Grundmetall im Säurebad (*Sparbeizen*).
Buntmetalle werden meist in verdünnter Schwefelsäure gebeizt. Durch Zusätze können glänzende oder matte Oberflächen (*Glanz-* bzw. *Mattbrenne*) und Färbungen erzielt werden. Für alle Beizbehandlungen ist gründliches Spülen unerläßlich.
Thermische Verfahren. Die Verfahren Glühen, Flammstrahlen, Blankglühen beschränken sich auf Metalle mit hohem Schmelzpunkt, wie z. B. Gußeisen und Stahl.

8.8.5. Oberflächenschutz mit organischen Anstrichmitteln

Anstrichstoffe bestehen aus den Grundbestandteilen Bindemittel, Farbmittel, Lösungsmittel und Zusatzmittel. Art und Menge der Komponenten bestimmen Einsatz und Auftragsmethode.

Streichen mit Pinsel ist die älteste manuelle Auftragsart. Sie hat für ortsfeste Konstruktionen, Einzelstücke und Instandhaltungsarbeiten auch heute noch Bedeutung.
Rollen mit Fell- oder porösen Kunststoffrollen ist bei großen ebenen Flächen und zur Erzeugung einfacher Muster üblich.
Spritzen ist das industriell am häufigsten angewendete Farbgebungsverfahren. Man unterscheidet manuell geführte und maschinell gesteuerte Spritzeinrichtungen. Der Anstrichstoff wird durch Druckluft einer Spritzdüse zugeführt und gleichmäßig auf das Werkstück gebracht. Dabei werden das *Niederdruckverfahren* mit 0,02 bis 0,05 MPa und das *Hochdruckverfahren* mit 0,1 bis 0,5 MPa Überdruck angewendet. Die Anstrichmittel können auch bei erhöhter Temperatur verspritzt werden.
Warmspritzen wird bei 35 bis 40 °C und *Heißspritzen* bei 70 bis 80 °C durchgeführt. Einsparung von Lösungsmitteln, weniger Arbeitsgänge und kürzere Trockenzeiten sind einige Vorteile.
Beim *Höchstdruckspritzen* (ohne Druckluft) wird das Auftragsmaterial ohne Druckluft mit einem Überdruck von 17,5 MPa (bei 20 °C) und 2,5 bis 6,0 MPa (bei 85 bis 90 °C) durch eine Düse gepreßt.
Elektrostatisches Spritzen ist ein Verfahren, das die Kräfte eines elektrostatischen Feldes zum rationellen Farbauftrag nutzt. Dabei werden die durch Luft, Zentrifugalkraft oder einen Hochspannungssprühspalt zerstäubten Farbpartikeln mit einer elektrischen Ladung (−) versehen. Entsprechend den Feldlinien werden sie auf das geerdete Werkstück (+) niedergeschlagen. Die angelegte Spannung beträgt bis 140 kV, die Stromstärke 1 bis 3 mA. Durch den sog. *elektrostatischen Umgriff* erfolgt ein nahezu verlustloser Auftrag auch auf die nicht dem Sprühorgan direkt zugewendeten Flächen. Das Verfahren ist für Kleinteile und sperrige Werkstücke geeignet. Es sind dafür Spezialanstrichstoffe erforderlich.
Tauchen ist, durch mögliche Einbeziehung der Vor- und Nachbehandlung, ein rationelles Ver-

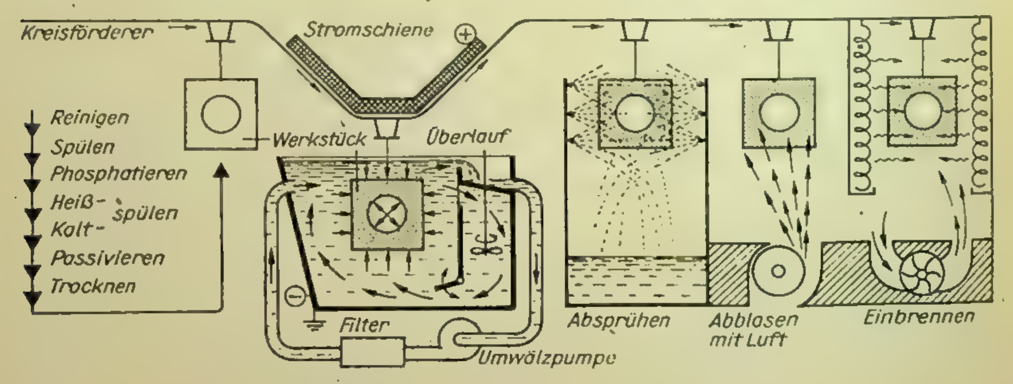


Abb. 8.8.5-1 Schema des elektrophoretischen Beschichtens (Electrocoating)

fahren für große Stückzahlen in kontinuierlichen Lackier- und Konservierungsstraßen. Eine Produktivitätssteigerung läßt sich mit dem *elektrophoretischen Tauchen* (*Elektrotauchlackierung*) erreichen. Das Werkstück ist als Anode (+) und das Tauchbecken als Katode (−) geschaltet. Es werden mit Wasser verdünnbare Anstrichstoffe eingesetzt (Abb. 8.8.5-1).
Weitere Anstrichmethoden sind das Gießen, Trommeln, Zentrifugieren, Fluten, Durchstoßen, Walzen u. a.

8.8.6. Oberflächenschutz mit anorganischen Überzügen

Chemische Oberflächenumwandlungen der Metalle durch verschiedene Agenzien ergeben Färbungen, Metallsalzniederschläge und Oxidschichten, die dekorativen, haftenden oder schützenden Erfordernissen genügen.
Brünieren von Stahl erfolgt mit Chlor- und Schwefelsalzen. Färbungen von Kupfer, Zink, Aluminium und Magnesium in zahlreichen Tönungen mit Chlor-, Schwefel-, Chrom- und Molybdänverbindungen.
Beim *Phosphatieren* werden Eisenphosphatsalze als Haftgrund für Anstriche und Fertigungshilfsstoffe aufgebracht. Das *MBV-Verfahren* (*m*odifiziertes *B*auer-*V*ogel-Verfahren) erzeugt mit alkalischer Kaliumchromatlösung eine ≈ 1 μm dicke gleichmäßige Oxidschicht auf Aluminiumteilen. Aber auch Bäder mit Phosphorsäure, Chromtrioxid und eine Nachbehandlung mit Natriumfluorid (Wasserglas) ergeben eine für korrosive Medien undurchlässige Oxidschicht an der Oberfläche.
Elektrochemische Oberflächenumwandlung. Das *Eloxalverfahren* ist für Aluminium von großer technischer Bedeutung. Das Werkstück wird als Anode geschaltet in die wäßrige Lösung von Schwefelsäure (seltener Chrom- oder Oxalsäure) gehängt. Gleichspannungen von 8 bis 30 V und Stromdichten von 30 bis 300 A/m^2 verstärken die natürliche Oxidschicht auf 10 bis 35 μm. Werkstoffbeschaffenheit, Badzusammensetzung und Arbeitsbedingungen lassen Dicke und Härte der Oxidschicht in weiten Grenzen variieren. Die Schicht läßt sich gut einfärben.
Diffusionsüberzüge auf Stahl. Das *Silizieren* erfolgt in Pulver mit Siliziumchlorid oder in Gas mit Siliziumtetrachlorid bei Temperaturen von 1000 bis 1200 °C. *Sulfinuzieren* wird zur Beeinflussung von Reibungsvorgängen beim Einlaufen von Gleitflächen mit Schwefelverbindungen im Temperaturbereich von 100 bis 900 °C durchgeführt.
Emaillieren ist die Aufbringung keramischer Überzugsmassen auf Metallen, vornehmlich Grauguß und Stahlblech (vgl. 6.4.).
Keramikspritzen nennt man das thermische Auftragen von Metalloxid- und Metallsilikatschichten als Verschleiß- und Wärmeschutz bei ungewöhnlichen Beanspruchungen, z. B. bei Raketen- und Strahltriebwerken. Der zu verspritzende Werkstoff wird in Pulver- oder Stabform einem mit Brenngas-Sauerstoff-Flamme oder Lichtbogenplasma beheiztem Sprühorgan zugeführt und bei hohen Temperaturen auf den Grundwerkstoff geschleudert.

8.8.7. Oberflächenschutz mit metallischen Schichten

Alle festen Werkstoffe können zur Erreichung bestimmter Eigenschaften mit Metallen beschichtet werden. Korrosions- und Verschleißschutz, Härte, Leitfähigkeit, Reibung, Chemikalienbeständigkeit, Reflexion, Aussehen u. a. Forderungen an die Oberfläche bestimmen das Überzugsmetall, während der Grundwerkstoff für Festigkeit, Elastizität, Masse, Wirtschaftlichkeit usw. sorgt.
Schmelztauchverfahren. Unter diesem Begriff sind alle Methoden des Tauchens eines festen Metalls in ein geschmolzenes zusammengefaßt.
Tauchverzinken, Feuerverzinken. Die in Salz- oder Schwefelsäure gebeizten Werkstücke werden im Flußmittel, einer Lösung aus Zink- und Ammoniumchlorid, getaucht. Nach dem Trocknen gelangen sie noch warm in ein Zinkbad von ≈ 450 °C (*Trockenverzinken*).
Eine Variante ist das sog. *Naßverzinken*. Hierbei ist die Oberfläche des schmelzflüssigen Zinkbads durch eine Tauchwand geteilt. Die Badoberfläche der einen Seite ist mit geschmolzenem Flußmittel bedeckt. Die nassen Werkstücke werden hierdurch in das Zinkbad getaucht und auf der freien Seite herausgenommen.
Solche Schmelztauchanlagen sind weitgehend mechanisiert, wobei für Bänder und Draht eine hohe Arbeitsproduktivität erreicht wird. Das sog. *Sendzimir-Verfahren* arbeitet mit Bandgeschwindigkeiten von über 100 m/min. Der Verzinkung ist hier eine Oxydations- und Reduktionszone vorgeschaltet.
Ähnlich wird in Schmelztauchverfahren verzinnt, verbleit und aluminiert.
Diffusionsüberzüge (Thermolyse). Diese Überzüge werden hauptsächlich bei Stahl angewendet und ergeben Legierungen mit dem Grundwerkstoff in einer dünnen Randzone. Bei den wichtigsten Verfahren hüllt das Überzugsmaterial als reines Metallpulver bzw. dessen Chlorid- oder Jodidverbindung das Werkstück ein. Bei der Behandlungstemperatur unterhalb des Schmelzpunkts bildet sich die Diffusionsschicht. Damit die Schicht nicht durch anschmelzende Partikeln des Hüllmaterials behindert wird, gibt man ein inertes Material, wie Sand, Tonerdepulver u. ä., zu.

Diffusionsverzinken, Sheradisieren wird mit Zinkpulver bei 300 bis 400 °C erreicht. Für Sonderzwecke bewirken Zinkdämpfe bei 870 °C die Diffusionsschicht.
Diffusionsaluminieren, Alitieren erfolgt mit Ferroaluminiumpulver und Ammoniumchloridzusatz bei 850 bis 1 100 °C.
Diffusionsverchromen, Inchromieren wird durch Erwärmen mit Chrom(II)-chlorid und beschleunigenden Zusätzen bei Temperaturen wenig unterhalb 1 000 °C ausgeführt.
Vakuumbedampfen. Auf metallischen und nichtmetallischen Grundflächen lassen sich dünne Metallschichten von 1 bis 3 μm in einer Hochvakuumglocke ($\approx 10^{-5}$ kPa) erzeugen. Durch elektrische Widerstands-, Induktions- oder Elektrodenstrahlerwärmung werden die meist edleren Überzugsmetalle auf Verdampfungstemperatur gebracht. Die sich geradlinig von der Verdampfungsquelle fortbewegenden Moleküle kondensieren auf dem in der Glocke befindlichen Werkstück (Abb. 8.8.7-1). Die Metallisierung erfolgt für vielseitige technische und dekorative Zwecke. Anwendungsgebiete sind Edelmetallschichten für Gebrauchs- und Schmuckgegenstände, Spiegelschichten für Reflektoren (Fahrzeugscheinwerfer), Leiterplatten elektronischer

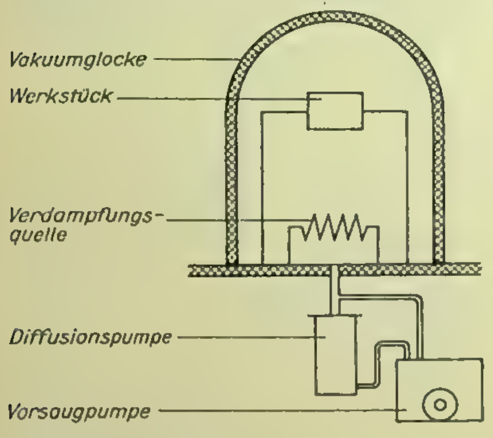


Abb. 8.8.7-1 Schema einer Vakuumbedampfungsglocke

Geräte u. a. Bei den Grundwerkstoffen Glas, Plast, Papier und Gewebe ergeben sich adäquate Anwendungsgebiete. Die dünnen Schichten sind gegen mechanische Beanspruchungen (Kratzer) empfindlich. Es werden auch Zerstäubungsverfahren im Hochvakuum angewendet, wo zur Verdampfung des Überzugsmetalls noch die katodische Versprühung in einer Edelgasatmosphäre von 10^{-4} bis 10^{-5} kPa kommt. Mit diesem Verfahren lassen sich auch keramische Überzüge auf Metallen herstellen.

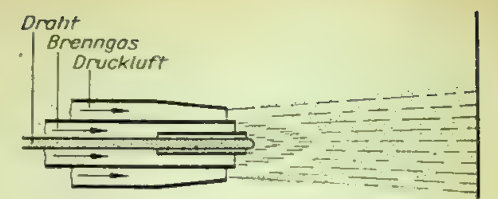


Abb. 8.8.7-2 Metallspritzpistole mit Brenngas-Sauerstoff-Flamme

Metallspritzen. Für den Korrosionsschutz und zur Regenerierung von Verschleißteilen bei ortsfesten und großflächigen Konstruktionen, aber auch bei Zapfen und Wellen, ist das Verfahren von großem Nutzen. Die zu verspritzenden Metalle werden der Sprüheinrichtung als Schmelze, Pulver, Gemenge oder Draht zugeführt. In Drahtform lassen sich die meisten Stahlsorten, Aluminium, Zink, Kupfer und ihre Legierungen einsetzen. Die dafür benutzte Spritzpistole (Abb. 8.8.7-2) enthält den Drahtvorschub und die Wärmequelle (Äthin-Sauerstoff-Gasgemisch oder elektrischer Lichtbogen). Mit Druckluft wird die Metallschmelze in beliebiger Dicke auf das Werkstück aufgetragen. Die Metallteilchen verankern sich mechanisch untereinander und mit der Werkstückoberfläche. Der Überzug ist rauh und porig, weshalb in der Regel eine Nachbearbeitung erfolgt. Auf gleiche Weise lassen sich auch Plast- und Keramiküberzüge herstellen.
Metallplattieren. Ein Grundmetall – vornehmlich in Form von Blech – wird durch Druck mit einem anderen Werkstoff bedeckt, um bestimmte Eigenschaften der Oberfläche unter ökonomischen Bedingungen zu erreichen. Das wenige Mikrometer bis einige Millimeter dicke Bedeckungsmetall wird durch Begießen, Lötzwischenschicht, Schweißen oder Kaltpreßschweißen bei gleichzeitigem Walzen mit dem Grundwerkstoff verbunden.
Spreng- oder Explosionsplattieren. Bei geformten Werkstücken – Rohre, Behälterböden u. a. – wird der Druck wie bei der Hochenergieumformung durch einen Sprengstoff erzeugt (vgl. 8.2.6., 8.4.2.). Stahlblech wird vornehmlich mit Edelstahl, Aluminium und Kupfer einschließlich ihrer Legierungen plattiert. Verbundwerkstoffe mit Plasten werden zur Isolierung gegen aggressive Medien, Wärme oder Elektrizität nach gleichartigen Verfahren hergestellt.
Chemische Metallabscheidung. Aus den wäßrigen Lösungen der Salze von Metallen und Halbmetallen lassen sich auf allen festen Werkstoffen Abscheidungen von Arsen (für Aluminium), Kadmium, Chrom, Kupfer, Gold, Eisen, Blei, Nickel, Kobalt, Palladium, Platin, Silber u. a. ohne Stromzufuhr herstellen. Mit Hilfe von Reduktionsmitteln werden die Metallionen aus den Salzen auf das Werkstück niedergeschlagen. Auch Nichtleiter, wie Glas, Keramik, Plast, Gewebe, werden für eine spätere galvanische

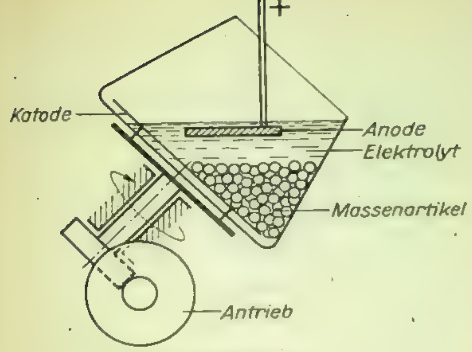


Abb. 8.8.7-3 Galvanisierglocke

Behandlung so mit einer dünnen Metallschicht versehen. Beispiele: Vernickeln mit Nickelsulfat unter Zusatz von Natriumhypophosphit (oder Natriumborhydrit) und organischen Säuren im 75 bis 100°C heißen Bad oder Versilbern und Verkupfern mit Formaldehyd als Reduktionsmittel (oft Vorstufe für den galvanischen Metallüberzug).

Neben diesen rein reduktiven chemischen Metallabscheidungen stehen die Tauch-, Kontakt-, Sud- und Anreibeverfahren. Bei diesen wirkt das unedlere (−) Grundmetall als Reduktionsmittel. Beim Tauchen oder Bestreichen von blanken Stahlflächen mit einer angesäuerten Kupfersulfatlösung (Kupfervitriol) entsteht ein ≈ 1 μm dicker Kupferniederschlag, der als Fertigungshilfsstoff (z. B. Stahldrahtzug) und Färbemittel dient. Die gegenüber Kupfer negativen Eisenionen gehen beim Bestreichen in Lösung. Die frei werdenden Elektronen bewirken die Reduktion der positiven Kupferionen, die sich auf der Stahloberfläche niederschlagen. Der Prozeß kommt mit dem Abdecken der Oberfläche durch das edlere Metall zum Stillstand.

Elektrolytische Metallabscheidung (Galvanisieren). Aus den wäßrigen Lösungen der Metallsalze, den *Elektrolyten*, lassen sich die Metalle mit Hilfe einer Fremdspannung abscheiden. Dabei wird das Werkstück als Katode und in der Regel das Überzugsmetall als Anode geschaltet (Abb. 8.8.7-3). Die Gleichstromquelle bewegt die Metallionen (+) aus der Lösung zum Werkstück, während die gleiche Menge aus der Anode wieder in Lösung geht. Die Elektrolyten enthalten Hilfsstoffe zur Beschleunigung der Abscheidung, Beeinflussung des Glanzes, Lösung von unerwünschten Verbindungen u. a. Einfluß auf die Galvanisierung haben Stromdichte, Spannung, Badtemperatur (Tab. 8.8.7-4), Dissoziationsgrad und weitere Faktoren. Die Zeitdauer und die davon abhängige Überzugsdicke sind nach den Faradayschen Gesetzen zu ermitteln.

Dekoratives *Glanzverchromen* wird zur Erzeugung von max. 1 μm dicken Überzügen auf glänzenden Nickelzwischenschichten angewendet. Technisches *Hartverchromen* wird zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit in Schichtdicken bis 0,5 mm unmittelbar auf dem Grundwerkstoff abgeschieden. Beide Verfahren benutzen eine unlösliche Anode aus Hartblei. Der Chromniederschlag wird aus der wäßrigen Lösung des Chromsäureanhydrids (CrO_3) bei Zusatz einer Fremdsäure (Schwefel- oder Fluorwasserstoffsäure) entnommen. Der Metallverlust im Elektrolyten – sonst aus der Anode gedeckt – muß hier durch Nachsetzen von Chromtrioxidlösung ausgeglichen werden. Die apparative Ausrüstung beim Galvanisieren reicht vom einfachen Behälter aus Steingut, Hartporzellan, Plast, Stahl mit Plast- oder Hartgummiauskleidung über Glokken- und Trommelapparat bis zur vollautomatischen und programmgesteuerten Behandlungsstraße. Transporteinrichtungen verketten auch alle Vor- und Nachbehandlungsstationen. Die Ausrüstung ist den Werkstücken nach Art, Abmessung und Stückzahl angepaßt. Besonders produktiv sind wieder Durchlaufautomaten für Band und Draht mit bis über 100 m/min Geschwindigkeit.

Tab. 8.8.7-4 *Wichtige galvanische Verfahren*

Verfahren	Hauptbestandteil des Elektrolyten	Badtemperatur in °C	Stromdichte in A/dm²
Vernickeln	Nickelsulfat	30 ··· 65	0,5 ··· 10,0
Verkupfern	Kupfersulfat	18 ··· 50	1,0 ··· 5,0
	Kupferzyanid	20 ··· 70	0,3 ··· 2,0
Vermessingen	Kupferzyanid, Natriumzinkzyanid	15 ··· 50	0,2 ··· 3,0
Verzinken	Natriumzinkzyanid	15 ··· 45	0,5 ··· 5,0
Bandverzinken	Zinksulfat oder -chlorid	20 ··· 50	1,0 ··· 200,0
Verkadmen	Natriumkadmiumzyanid	15 ··· 25	0,5 ··· 2,0
Verzinnen	Natriumstannat	80 ··· 95	1,0 ··· 1,5
	Zinnsulfat	15 ··· 25	0,5 ··· 1,5
Versilbern	Kaliumsilberzyanid	15 ··· 25	0,5 ··· 2,0
Vergolden	Kaliumgoldzyanid	20 ··· 70	0,1 ··· 1,0
Verstählen	Kaliumeisenzyanid	15 ··· 25	0,2 ··· 0,3
Verchromen	Chromsäureanhydrid	30 ··· 60	10,0 ··· 60,0

8.9. Automatisierung der Fertigungstechnik

Die Mechanisierung und Automatisierung von Fertigungsprozessen dient der Entlastung des Menschen und der Erhöhung der Effektivität des Fertigungsprozesses (vgl. Hauptkapitel 13.).
Die Automatisierung befaßt sich mit einzelnen Arbeitsgängen bis zu kompletten Prozessen in allen Industriezweigen. Die Automatisierung in der Fertigungstechnik umfaßt alle Prozeßstufen vom Rohmaterial bis zum Fertigteil, wie Bearbeitungs-, Transport- und Hilfsprozesse.

8.9.1. Voraussetzung der Automatisierung

Anzahl und Form. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Lösung eines Automatisierungsvorhabens ist i. allg. eine genügend hohe *Stückzahl*. Je größer diese ist, desto umfassender kann die Lösung sein. Ausreichend hohe Stückzahlen stehen meist nur bei der *Massenfertigung von Normteilen*, wie Schrauben, Stifte, Wälzlager usw., zur Verfügung. Viele Erzeugnisse der metallverarbeitenden Industrie, besonders im Maschinenbau, haben nur kleine Serien. Um auch hier automatisieren zu können, müssen besondere Maßnahmen getroffen werden. Durch *Standardisierung*, *Unifizierung* und *Klassifizierung* erhöht man die Stückzahl gleicher oder zumindest ähnlicher Werkstückformen und -abmessungen, die eine gemeinsame technologische Bearbeitung ermöglichen (Abb. 8.9.1-1). Die Zusammenführung solcher ähnlicher oder gleicher Werkstücke mehrerer Betriebe in einer *zentralen Fertigung* ergibt ebenfalls automatisierungsfähige Stückzahlen. Die Klassifizierung von Teilen und die Anwendung von *Wiederholteilkatalogen* sind Beiträge der produktionsvorbereitenden Abteilungen zur Stückzahlerhöhung. Die Zusammenfassung ähnlicher Teile auf einer Maschine mit nur geringem Umrüstaufwand zwischen den Teilen zur *Gruppenbearbeitung* ist damit möglich. Trotz unterschiedlicher

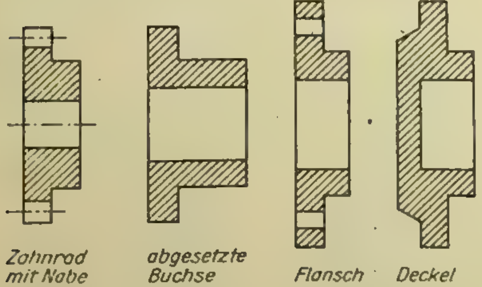


Abb. 8.9.1-1 *Fertigungstechnisch ähnliche Werkstücke*

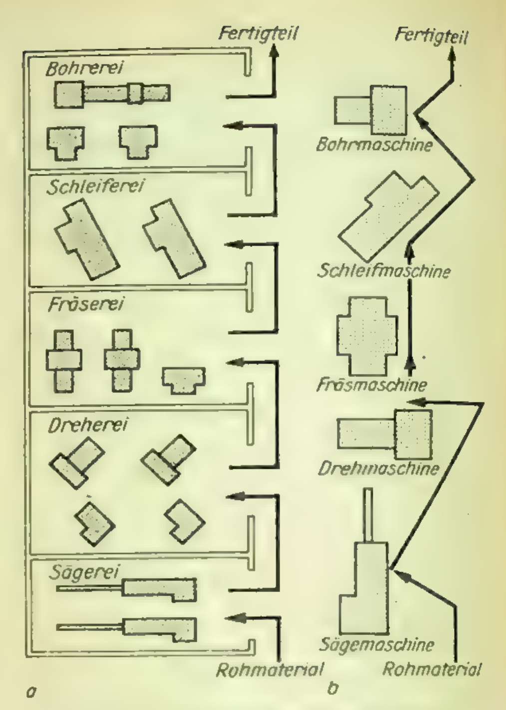


Abb. 8.9.1-2 *Anordnung von Bearbeitungsmaschinen: **a** Werkstätten-, **b** Gegenstandsprinzip*

Funktion und Aussehen enthalten diese Werkstücke gleiche Formelemente, wie Nabe oder Flansch.

Fertigungsablauf. Die Erhöhung der Effektivität im Fertigungsprozeß verlangt, daß mit wachsender Stückzahl von der *Werkstätten-* zur *Fließfertigung* übergegangen wird (Abb. 8.9.1-2). Bei der Fließfertigung stehen Bearbeitungsmaschinen unterschiedlicher Verfahren so zusammen, daß bestimmte Teile, z. B. Zahnräder oder Wellen, in einem relativ schnellen Durchlauf ohne lange Zwischenlagerungen vom Rohmaterial bis zum Fertigteil bearbeitet werden. Werden diese Maschinen längs einer geeigneten Fördereinrichtung für die Werkstücke, z. B. Band- oder Rollenförderer, angeordnet, so entsteht eine *Maschinenfließreihe*. Bei ausreichender Stückzahl kann diese Fördereinrichtung zu einer automatisch arbeitenden Maschinenverkettung erweitert werden, und es entsteht eine automatische Maschinenfließreihe für einen Werkstücktyp oder eine *Wechselfließreihe* für eine Gruppe ähnlicher Teile.

Voraussetzung für die Schaffung wirtschaftlicher Lösungen für Wechselfließreihen und Bearbeitungszentren war die Entwicklung geeigneter Steuerungen (vgl. Hauptkapitel 12.), insbesondere der numerischen Steuerungen (vgl. 8.9.2.), und Kontroll- und Überwachungseinrichtungen, z. B. *Meßsteuerungen*.

Drehautomaten, die es mit einer oder mehreren (4, 6 oder 8) Arbeitsspindeln gibt, werden für die automatische Fertigung von Massenteilen eingesetzt. Die Einspindelautomaten haben ein automatisch betätigtes Werkzeugmagazin (Trommel- oder Revolverdrehmaschine, vgl. 8.3.2.). Die Werkstücke werden einzeln als Rohlinge zugeführt oder von Stangenmaterial abgearbeitet. Die Bearbeitung erfolgt nach einem festen Programm, das dem Automaten in Form von meist mechanischen Steuereinrichtungen, wie Nockenbahnen oder Kurven, eingegeben ist. Diese Steuereinrichtungen sind, wenn auch mit gewissem Zeitaufwand, austauschbar, und der Automat kann auf ein anderes Werkstück eingerichtet werden.

Baukastenprinzip. Maschinenbausätze verschiedener Formen gestatten, aus Baueinheiten, wie Gestellen, Schlitten, Bohreinheiten, Sondermaschinen aufzubauen, die verbunden mit einem Schalttisch auch zu *Mehrstationenmaschinen* (Abb. 8.9.2-1) kombiniert werden können. Bei Änderungen des Produktionsprogramms können solche Sondermaschinen zerlegt bzw. für andere Werkstücke neu zusammengestellt werden. Die praktische Bedeutung solcher Baukästen liegt jedoch mehr in der größeren Disponibilität für Hersteller und Projektant.

Fließreihen. Während eine Mehrstationen-Rundtischmaschine für kleine Werkstücke eine günstige Verkettung darstellt, verlangen große Werkstücke mit vielen Arbeitsgängen eine automatische Fließreihe (*Fließ-, Transfer-* oder *Taktstraße*), bei der die einzelnen Bearbeitungsstationen beiderseits einer automatischen Werkstücktransporteinrichtung angeordnet sind, die *im*

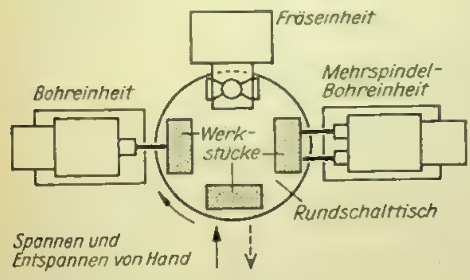


Abb. 8.9.2-1 *Rundtischautomat*

Takt arbeitet oder mit sog. *Pufferstationen* zwischen den Maschinen nicht taktgebunden transportiert. Solche Fließreihen werden durch weitere Einrichtungen, wie automatische Meßplätze, Reinigungs- und Konservierungsstationen sowie zentrale Hilfsstoffanlage und Spänebeseitigung, komplettiert. Steigender Automatisierungsgrad erfordert einen immer höheren Anteil an Kontroll- und Meßtechnik zur

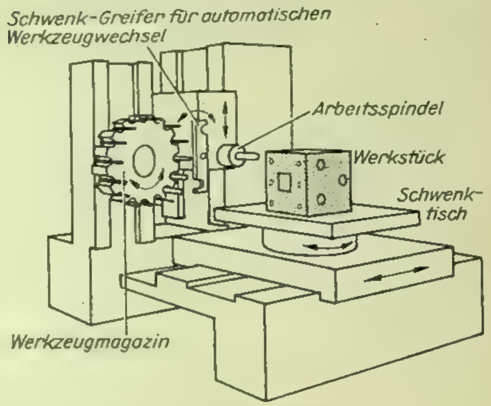


Abb. 8.9.2-2 *Numerisch gesteuertes Bearbeitungszentrum*

Überwachung der Maschinenfunktionen, z. B. Anzeige von Werkzeugbrüchen, und der Werkstückqualitäten.

Steuerungen. Für die wirtschaftliche Fertigung von mittleren und kleineren Stückzahlen müssen wesentlich flexiblere Fertigungsmittel eingesetzt werden. Es müssen Automaten verwendet werden, deren Programme schnell ausgewechselt werden können.

Kopiersteuerungen arbeiten elektrisch oder hydraulisch, tasten ein Normal, z. B. eine Schablone, ab und übertragen dessen Form auf das Werkstück. Diese Steuerung wird in Kopierdrehmaschinen und -fräsmaschinen angewendet. Einstellbare *Programme*, wie Nockenbahnen und Schrittschaltwerke, werden ebenfalls an Bearbeitungsmaschinen eingesetzt.

Numerische Steuerungen (NC, numerical control). Der gewünschte Steuerungsablauf wird auf einem *Lochband* gespeichert, das leicht gegen ein Band für ein anderes Werkstück ausgetauscht werden kann. Die Steuerung verarbeitet die eingelochten Informationen schnell und präzis (vgl. 14.3.7.). Hierzu sind neben den Bewegungsachsen an den numerisch gesteuerten Maschinen Meßachsen hoher Präzision notwendig. Die Lochbänder können neben den Informationen für den Vorschubweg der Supporte für Werkstücke und Werkzeuge weitere Befehle für die Durchführung des Bearbeitungsprozesses, wie Werkstückdrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Werkstückwechsel u. a., enthalten (Tafel 32).

Numerisch gesteuerte Bearbeitungszentren für Bohr- und Fräsarbeiten ermöglichen die weitgehende Fertigbearbeitung eines Werkstücks in einer Aufspannung von mehreren Seiten mit Hilfe eines Schwenktischs (Abb. 8.9.2-2). In einem Trommelmagazin steht die notwendige Anzahl voreingestellter Werkzeuge bereit, die

mittels einer Wechseleinrichtung in der programmierten Reihenfolge automatisch in die Arbeitsspindel eingesetzt und entnommen werden (Tafel 31).

Maschinensysteme entsprechen den automatischen Fließreihen, weisen aber aufgrund des Einsatzes numerisch gesteuerter Bearbeitungsstationen und Transporteinrichtungen ein Höchstmaß an Flexibilität gegenüber Änderungen im Werkstücksortiment auf. Innerhalb einer bestimmten Klasse, d. h. Ähnlichkeit, können unterschiedliche Werkstücke in nahezu beliebiger Folge gefertigt werden. Ein Prozeßrechner übernimmt Transportsteuerung, Programmbereitstellung und bestimmte Optimierungsaufgaben. Ähnliche Automatisierungseinrichtungen wie die oben beschriebenen werden in der Umform- und Fügetechnik eingesetzt.

Mikroprozessoren ermöglichen durch ihre Eigenschaften, große Informationsmengen auf kleinstem Raum speichern und verarbeiten zu können, neue Wege für die Steuerung von Maschinen und Prozessen. Sie werden als Kleinrechner für die Steuerung von Werkzeugmaschinen, zur Verarbeitung von Informationen und Signalen aus dem Prozeß- und Bewegungsablauf nach vorgegebenem Programm oder für den Aufbau freiprogrammierbarer Steuerungen benutzt, wobei über das Tastenfeld wie bei einem Kleinrechner die Steuerungsfolge eingespeichert wird. Sie kann gelöscht, im Programm korrigiert oder durch eine inhaltsneue Steuerfolge ersetzt werden (vgl. 14.3.3.).

9. Maschinenelemente — Hydraulik — Pneumatik

9.1. Maschinenelemente

Bei der Herstellung oder Montage von Maschinen, Geräten u. a. technischen Einrichtungen werden häufig Bauelemente benötigt, die in gleicher o. ä. Form mit einem bestimmten Funktionsinhalt in den verschiedensten Gebieten der Technik Verwendung finden. Diese Bauteile werden als *Maschinenelemente* bezeichnet. Es gibt einteilige, z. B. Schrauben, oder aus mehreren Teilen bestehende Maschinenelemente, z. B. Kupplungen.

Zur Gewährleistung des *Austauschbaus* und gleichbleibender Gebrauchseigenschaften werden Maschinenelemente genormt. Sie sind *Normteile*, wenn alle wesentlichen Eigenschaften verbindlich festgelegt sind.

Die Normung der Haupteigenschaften und der große, durch die allgemeine Anwendung bedingte Bedarf an solchen Maschinenelementen bringt große Stückzahlen für die Herstellung und damit die Vorteile einer zentralen Fertigung (vgl. 8.9.1.). Normteile werden deshalb vom Verbraucher als Kaufteile preiswert bezogen.

Toleranzen. Die Basis für die Austauschfähigkeit ist die Tolerierung der Abmessungen. Toleranzen legen exakt fest, innerhalb welcher Grenzen die Abmessungen eines Werkstücks liegen dürfen,

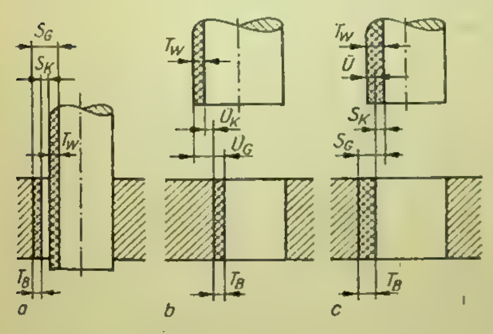


Abb. 9.1.0-1 Passungsarten: a Spiel-, b Preß-, c Übergangspassung. T = Maßtoleranz der Welle (T_W) bzw. Bohrung (T_B). Ü = Übermaß. S = Spiel, G = Größt-..., K = Kleinst-...

um den vollen Gebrauchswert zu gewährleisten.

Passungen werden durch die Toleranzen zweier zusammengefügter Teile gebildet. Je nach Lage des Toleranzfelds und Größe ergeben sich verschiedene Spiele zwischen beiden Teilen. Abb. 9.1.0-1 zeigt 3 Möglichkeiten aus der Vielzahl der Passungen. Zur Minderung der Vielfalt und ökonomischen Handhabungen sind die Toleranzen und Passungen genormt und in Auswahlreihen zusammengestellt. Man kennt das System der *Einheitswelle* und der *Einheitsbohrung*, bei denen jeweils eine Toleranzgrenze dem Nennmaß des Werkstücks entspricht, die Welle kann nur kleiner, die Bohrung nur größer als das Nennmaß sein. Die Toleranzen werden in 18 *Qualitäten* eingeteilt, wobei die Qualität 1 die engste Toleranz hat.

9.1.1. Verbindungselemente

Verbindungselemente werden benötigt, um Bauteile unlösbar oder lösbar miteinander zu verbinden. Zu den lösbaren Verbindungselementen zählen z. B. Schrauben, zu den unlösbaren Niete.

Unlösbare Verbindungselemente. Die wichtigsten Elemente sind die *Niete*. Sie werden nach der Kopfform des Rohniets bezeichnet (vgl. 8.4.5.). *Schrumpfverbindungen* nutzen die Wärmedehnung der Metalle. Zwischen die zu verbindenden Teile wird ein erwärmter Zuganker gebracht, der sich beim Erkalten zusammenzieht und die Werkstücke zusammenpreßt. Die benötigten Kräfte bestimmen die notwendigen Längendifferenzen zwischen Zuganker und Werkstücken im kalten Zustand. Die aufwendigen Niet- und Schrumpfverfahren werden nach Möglichkeit durch *Kleben*, *Löten* oder *Schweißen* ersetzt, wobei besonders die Klebetechnik eine progressive Entwicklung und Anwendung erfährt (vgl. 8.4.).

Lösbare Verbindungselemente. Zu den lösbaren Verbindungselementen gehören Schrauben, Muttern, Keile, Paßfedern, Stifte, Bolzen und Splinte, aber auch Mitnehmer- und Klemmverbindungen.

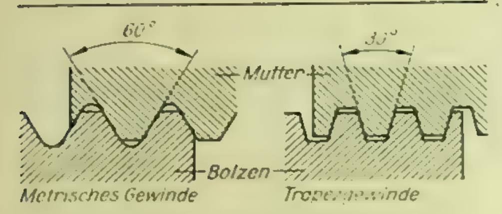


Abb. 9.1.1-1 Schraubengewindearten

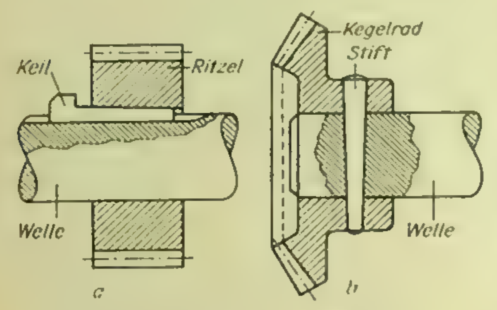


Abb. 9.1.1-2 a Nasenkeil-, b Kegelstiftverbindung

Befestigungsschrauben haben meist metrisches Spitzgewinde mit Dreieckprofil; bei extremen Einsatzbedingungen wird Rundgewinde und für *Bewegungsschrauben* Trapez- oder Flachgewinde eingesetzt (Abb. 9.1.1-1). Man unterscheidet Links- und Rechts- sowie ein- oder mehrgängige Gewinde. Die Gewindesteigung, der Weg pro Umdrehung, entspricht dem Abstand zweier benachbarter Gewindekämme oder -spitzen bzw. dem *n*-fachen Betrag bei *n*-gängigen Gewinden.

Nach der Abmessung einer Ganghöhe unterscheidet man metrisches Gewinde, Feingewinde und Zoll- (Whitworth-)Gewinde. Nach der Kopfform unterteilt man in Zylinder-, Senkschrauben u. a. und nach den Werkzeugflächen in Sechskant-, Schlitzschrauben u. a. Die Gewindeherstellung erfolgt durch Walzen oder Schneiden (vgl. 8.3.2.).

Maschinenteile können durch *Keile* oder *Stifte* (Abb. 9.1.1-2) verbunden werden. Es gibt verschiedene Keilformen, wie Nasen-, Treib- oder Tangentialkeile, sowie Querkeile zur Aufnahme von Zug- und Druckkräften in Gestängen. Bekannte Stiftformen sind Zylinder-, Kegel- und Kerbstifte. Bewegliche Verbindungen, Gelenke, können mittels *Bolzen* hergestellt werden.

Paßfedern sind Mitnehmerverbindungen. Sie übertragen mit ihren eingepaßten Flanken Drehmomente, wie z. B. zwischen Welle und Zahnrad, gestatten aber ein axiales Verschieben. Anstelle einer können mehrere Paßfedern am Umfang verteilt sein oder Welle und Nabe sind als *Keilwellen-* oder *Polygonprofil* gestaltet.

Lösbare Verbindungen können auch durch spezielle Spannelemente, wie durch aus 2 konischen Ringen bestehende *Ringfederspannelemente* (Abb. 9.1.1-3) oder durch *Klemmverbindungen*, z. B. Schalenkupplungen, hergestellt werden.

Sicherungselemente verhindern das unbeabsichtigte Lösen von Schrauben und Muttern. Dazu zählen u. a. *Sicherungsbleche* und *-ringe*, *Splinte*, *Stifte*, *Federringe* (Abb. 9.1.1-4).

9.1.2. Federn

Federn sind elastische Verbindungselemente. Sie speichern mechanische Arbeit, dämpfen Stöße, messen und begrenzen Kräfte, vergrößern oder vermindern Schwingungen. Die *Federsteife* definiert den Federweg unter einer bestimmten Belastung.

Metallfedern erreichen die beabsichtigte Federwirkung durch eine bestimmte Formgebung, z. B. als Schrauben- oder Blattfeder. Sie haben eine lineare Federkennlinie und fast keine Hysterese. Metallfedern lassen sich einteilen in *Torsionsfedern*, z. B. Schrauben- (Abb. 9.1.2-1) und Drehstabfedern, in *Biegefedern*, wie Blatt- und Tellerfedern, und in *Zug/Druckfedern*, wie z. B. Ringfedern (vgl. Abb. 9.1.1-3).

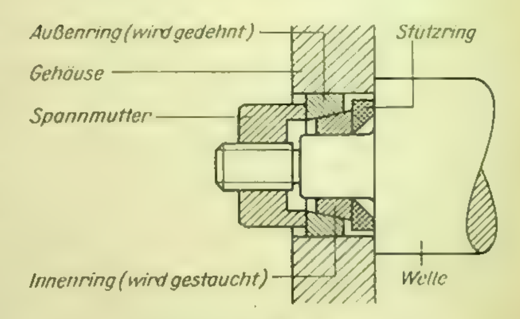


***Abb. 9.1.1-3** Ringfederspannelement*

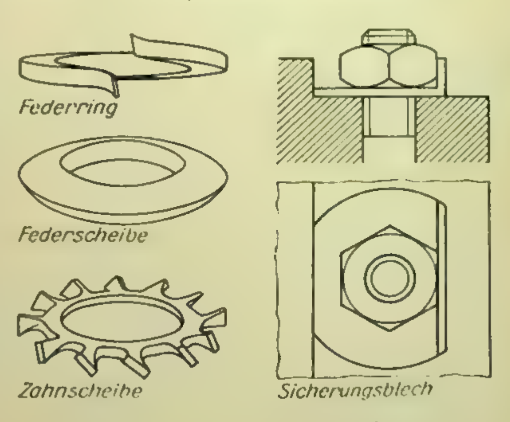


***Abb. 9.1.1-4** Schraubensicherungselemente*

Masse ≈ 40 kg Schraubenfeder
Flüssigkeitsfeder Masse ≈ 7,4 kg
Kolben
Dichtung
Gehäuse
Öl
470
345
⌀226
⌀90

Abb. 9.1.2-1 *Vergleich einer Schrauben- und Flüssigkeitsfeder*

Stoffedern nutzen die bestimmten Stoffen innewohnenden Federeigenschaften direkt aus, z. B. Gummi-, Gas-(Luft-) und Flüssigkeitsfedern (vgl. Abb. 9.1.2-1).

9.1.3. Lagerungen

Lagerungen ermöglichen Dreh- oder Gleitbewegungen von Maschinenelementen. Zu unterscheiden sind *Radiallager*, das sind Traglager, bei denen die Welle mit der Mantelfläche auf der Lagerfläche liegt, und *Axiallager* (Längs- oder Spurlager, vgl. Abb. 9.1.4-3), bei denen die Stirnfläche der Welle oder ein Wellenbund die Kräfte auf das Lager überträgt.

Wälzlager werden nach ihrer Bauform eingeteilt (Abb. 9.1.3-1). Jede Ausführung ist bestimmten Belastungsfällen angepaßt. Gemeinsam ist jedem Lager ein stehender und ein mit dem rotierenden Maschinenelement umlaufender Ring, die die Laufbahnen für die in einem Käfig geführten Wälzkörper, Kugeln, Rollen oder Nadeln tragen.

Die erforderliche Bewegung wird durch das Abrollen der Wälzkörper auf den Ringen ermöglicht. Die Schmierung erfolgt allgemein durch eine Fettfüllung. Durch Dichtungen wird das Lager gegen Verschmutzung gesichert. Wälzlager sind einbaufertige Normteile, wartungsfrei und für einen großen Kraft- und Geschwindigkeitsbereich einsetzbar.

Gleitlager. Bei *Gleitlagern* liegt der Zapfen der Welle unmittelbar der Lagerschale auf. Die bei Bewegung auftretende Gleitreibung wird durch einen Gleitfilm aus Öl vermindert. Bei richtiger Lagerdimensionierung geht beim Anlauf die *Trocken-* in eine *Mischreibung* und schließlich in eine verschleißfreie *Flüssigkeitsreibung* (Abb. 9.1.3-2) über, da im engsten Lagerspalt ein Schmiermitteldruck entsteht, der die Welle von der Lagerfläche abhebt (*hydrodynamische Schmierung*).

Zur Verminderung des Anfangsverschleißes werden spezielle *Lagerwerkstoffe*, wie Weißmetall oder Bronzen, Sintermetalle oder Kunststoffe, eingesetzt. In Sonderfällen wird das Öl unter Druck in die Lagerung gepreßt (*hydrostatische Lagerung*), so daß der Trageffekt auch ohne hydrodynamische Kräfte entsteht. Mo-

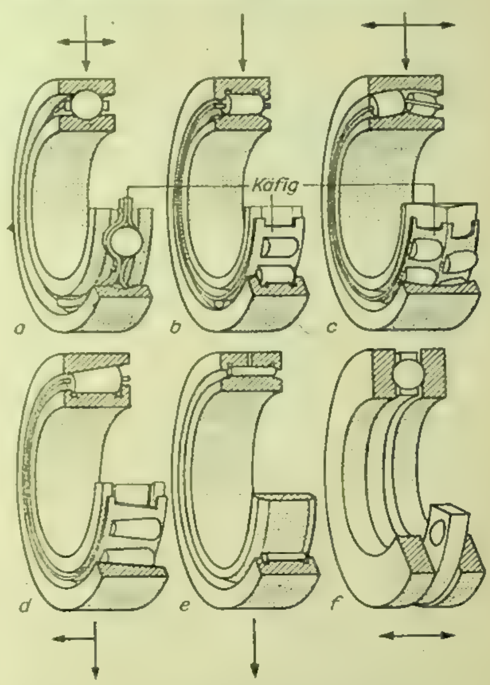


Abb. 9.1.3-1 *Wichtige Wälzlagerarten: a und f Rillenkugellager, b Zylinderrollen-, c Doppel-Pendelrollenlager, d Kegelrollen-, e Nadellager; a bis e sind Radial-, f ist ein Axiallager; die Pfeile zeigen Richtung und Stärke der Belastbarkeit an*

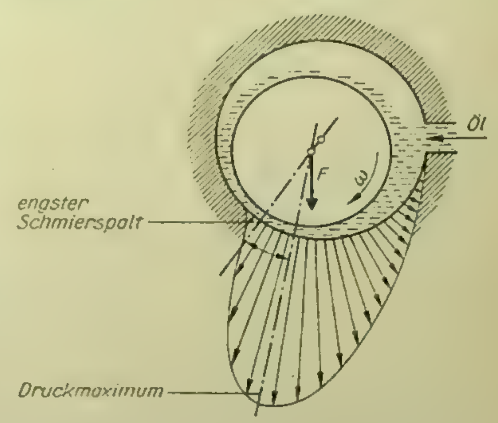


Abb. 9.1.3-2 *Druckverteilung im Schmierspalt eines Gleitlagers*

derne und hochwertige Gleitlager arbeiten mit mehreren am Umfang verteilten Tragflächen (Mehrflächengleitlager oder Segmentlager). Dadurch entstehen mehrere Druckberge, die die rotierende Welle fester einspannen und ihr damit eine höhere Steife und Laufruhe verleihen. Auch Gleitlager sind in einigen Abmessungen als Normteile erhältlich. Sie sind gegenüber Wälzlagern geräuschärmer, schwingungsdämpfend und bei Großlagern billiger, allerdings in Aufwendungen und Wartung ungünstiger. Die Schmierung erfolgt selbsttätig durch Tauch-, Umlauf- oder Zentralschmierung (vgl. 9.1.8.). Das Schmieröl muß gefiltert und gewartet werden.

Dichtungen verhindern den Eintritt von Staub oder Austritt von Schmiermitteln. Man unterscheidet berührende Dichtungen, wie Gummiformelemente (Simmerringe) oder Manschetten, und nicht berührende Dichtungen, wie Spritz- oder Labyrinthringe, die durch eine Aufeinanderfolge von engen Spalten und Erweiterungen, den Entspannungsräumen, längs der Dichtstrecke durch einen Druckabbau den Schmiermittelaustritt behindern.

9.1.4. Wellen, Achsen, Zapfen

Wellen sind umlaufende Maschinenteile, die Drehmomente übertragen. Man bezeichnet sie nach ihrer Bauform als gerade, biegsame, Gelenk-, Teleskop-, Nocken- oder Kurbelwellen.

Biegsame Wellen (Abb. 9.1.4-1) sind nur zur Übertragung kleiner Drehmomente geeignet,

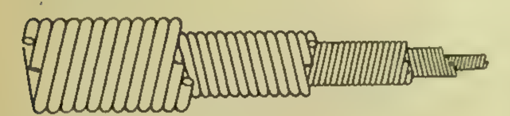


Abb. 9.1.4-1 Aufbau einer biegsamen Welle

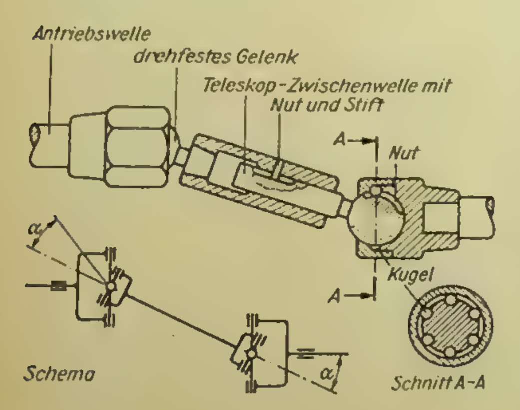


Abb. 9.1.4-2 Gelenkwelle, unten Schema

z. B. als Tachometerwellen. Sie bestehen aus mehreren Lagen Stahldrähten.

Gelenkwellen (Abb. 9.1.4-2) verbinden Wellen, die ihre Lage zueinander ändern.

Teleskopwellen sind in ihrer Länge veränderliche Wellen. Entweder sind es ineinandergeschobene Profilwellen oder durch Paßfedern verbundene Wellen.

Achsen, wie die Radachsen von Waggons, sind Trägerelemente. Sie übertragen kein Drehmoment, sondern Stütz- bzw. Biegekräfte.

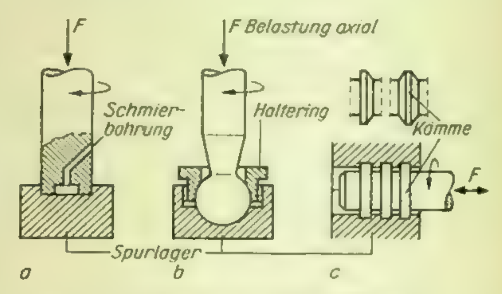


Abb. 9.1.4-3 Spurzapfen: a ringförmiger Spurzapfen, b kugeliger Stützzapfen, c Kammzapfen

Zapfen sind Lagerstellen von Wellen oder Achsen. *Tragzapfen* werden als Stirn- oder Kegelzapfen radial belastet. *Stützzapfen*, wie ringförmige, kuglige oder Kammzapfen, nehmen axiale Kräfte auf (Abb. 9.1.4-3).

9.1.5. Kupplungen

Kupplungen dienen zum Verbinden von Wellen und Übertragen von Drehmomenten.

Feste Kupplungen verbinden 2 fluchtende Wellenenden miteinander. Sie können keine Lage- oder Bewegungsfehler ausgleichen. Nach der Bauform unterscheidet man die *Schalen-* und *Flansch-* oder *Scheibenkupplung*. Die Kupplungsteile sind fest miteinander verschraubt.

Elastische oder *Ausgleichskupplungen* besitzen formschlüssige Übertragungselemente mit Spiel, wie Zähne, Klauen oder Bolzen, oder elastische Übertragungselemente, wie Gummipuffer oder Federelemente. Sie können in bestimmtem Maße Bewegungsfehler zwischen den Wellen, beispielsweise durch Achsversatz, ausgleichen.

Schaltkupplungen gestatten das Trennen der Wellen bei Bedarf. Es gibt Kupplungen, die nur bei Stillstand der Wellen geschaltet werden können, wie ausrückbare Klauen- u. a. formschlüssige Kupplungen, und lastschaltbare Kupplungen, wie Reibkupplungen. Beispiele sind die Kegel- (Abb. 9.1.5-1) und Lamellenkupplung (Abb. 9.1.5-2), letztere vergrößert durch mehrere Lamellenpakete die Reibfläche und damit die übertragbare Leistung.

Sicherheitskupplungen begrenzen Drehmomente, indem sie beim Überschreiten eines Grenzmoments rutschen oder sich lösen.
Magnetpulverkupplungen nutzen Eisenpulver, *Strömungskupplungen* Flüssigkeiten als Übertragungselement.

9.1.6. Bremsen und Gesperre

Bremsen sind Maschinenelemente zum Verlangsamen oder Anhalten bewegter Maschinenteile, wie drehende Wellen oder Räder. Sie wirken als Reibungsbremsen. Bekannte Bauformen sind *Band-*, *Backen-* und *Scheibenbremsen* (Abb. 9.1.6-1). Die Bremsflächen sind meist mit einem besonderen Bremsbelag versehen. Die Bremskräfte werden von Hand, elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch aufgegeben (vgl. 10.1.5.). *Lamellenbremsen* entsprechen in ihrem Aufbau den Kupplungen (vgl. Abb. 9.1.5-2).
Gesperre übertragen Teilbewegungen rotierender Maschinenelemente, hemmen oder sperren vollständig.
Rasten oder *Verriegelungen* (Abb. 9.1.6-2a) halten in vorbestimmten Rasten fest.
Schaltwerke, wie Malteserkreuze o. a. kinematische Getriebe, formen gleichförmige Umdrehungen in ungleichförmige, beispielsweise hin- und hergehende, Bewegungen um.
Reib- oder *Zahngesperre* (Abb. 9.1.6-2b) lassen nur eine Drehrichtung zu.

9.1.7. Triebe

Triebe oder Getriebe sind Baugruppen, die zwischen 2 Wellen geschaltet sind und zur Übertragung und Veränderung der Drehmomente und Geschwindigkeiten dienen. Das Wandlungs- oder Übersetzungsverhältnis zwischen treibender und getriebener Welle kann gestuft oder stufenlos je nach Bauart des Getriebes gewählt werden. Bei einem *Übersetzungsgetriebe* läuft die getriebene Welle schneller (Trieb ins Schnelle), bei einem *Untersetzungsgetriebe* die Antriebswelle (Trieb ins Langsame). Bei konstanter Leistung verhalten sich die übertragbaren Momente umgekehrt wie die Geschwindigkeiten.

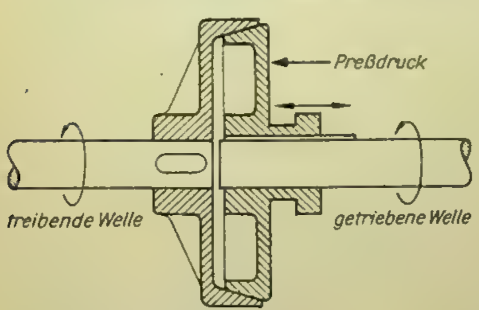


Abb. 9.1.5-1 Kegelkupplung

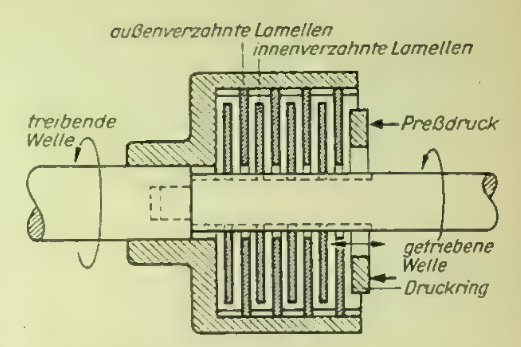


Abb. 9.1.5-2 Lamellenkupplung

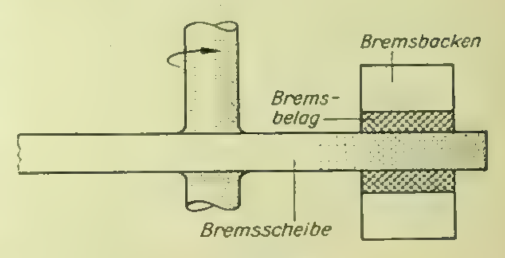


Abb. 9.1.6-1 Scheibenbremse

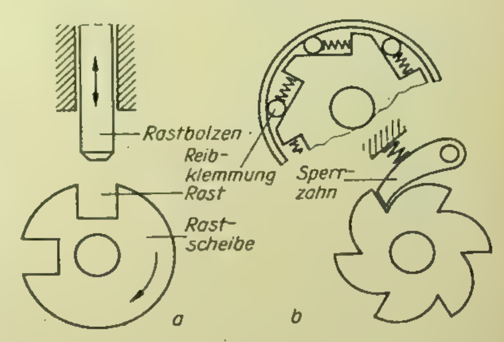


Abb. 9.1.6-2 a Rastscheibe, b Reib- und Zahngesperre

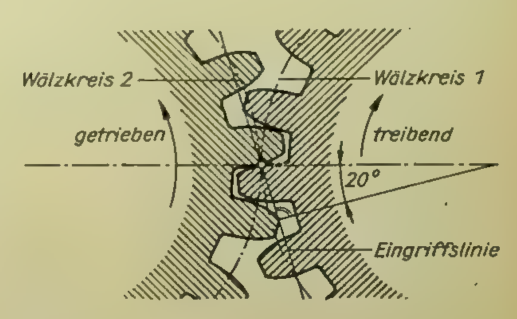


Abb. 9.1.7-1 Evolventenverzahnung

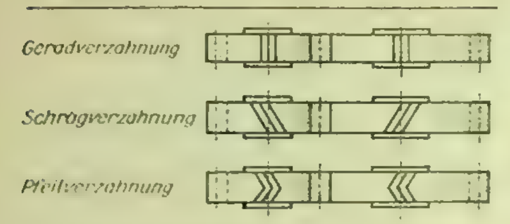
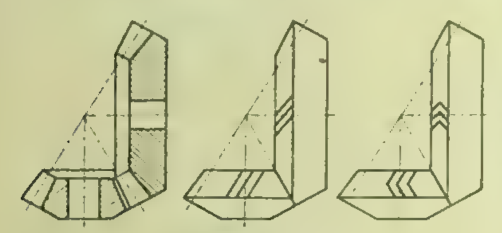


Abb. 9.1.7-2 Stirnradtrieb


Abb. 9.1.7-3 Kegelradtrieb

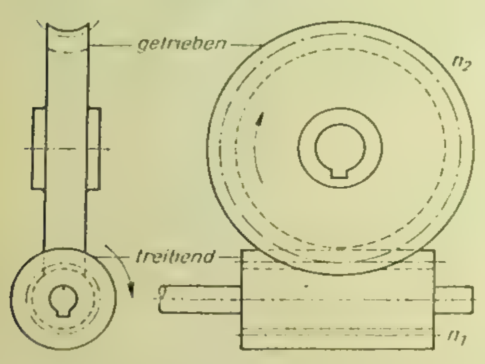


Abb. 9.1.7-4 Schneckentrieb

Zahnradtriebe übertragen Drehmomente formschlüssig und schlupffrei mittels einer *Verzahnung* auf treibendem und getriebenem Rad (Abb. 9.1.7-1). Die *Zahnform* muß so beschaffen sein, daß die getriebene Welle stoß- und ruckfrei umläuft, wenn sich die treibende Welle gleichförmig dreht. Erreicht wird dies durch die *Evolventenform* der Zahnflanken. Sie ist die häufigste Verzahnungsform, weil sie einfach und genau herstellbar ist. Durch ihre Konstruktion wälzen sich Zahnräder ohne zu gleiten mit gleicher Umfangsgeschwindigkeit auf den *Teil-* oder *Wälzkreisen* ab. Ihre Drehzahlen verhalten sich umgekehrt wie die Teilkreisdurchmesser. Eine Bestimmungsgröße für die Zahngröße ist der *Modul*. *Stirnradtriebe* haben parallele Achsen. Sie verwenden Stirnzahnräder mit gerader, schräger oder pfeilförmiger Verzahnung, bezeichnet nach der Lage des Zahnkamms zur Radachse (Abb. 9.1.7-2). Weitere Zahnradtriebe sind *Kegelradtriebe* für sich kreuzende Wellenachsen (Abb. 9.1.7-3) und *Schneckentriebe* bei großem Achsabstand, großen Übersetzungsverhältnissen oder Kräften (Abb. 9.1.7-4). Anstelle eines Zahnrads kann eine *Zahnstange* treten.

Hülltriebe verwenden zwischen treibendem und getriebenem Rad bzw. Riemenscheibe ein *Hüllelement*, wie Riemen, Seil oder Kette. Ihr Vorteil ist die Überbrückung großer Achsabstände, für die keine Zahnräder angewendet werden können. Die Achslage kann parallel oder gekreuzt sein (Abb. 9.1.7-5). Die Drehmomentübertragung geschieht durch Reibung eines oder mehrerer Hüllelemente, die vorzugsweise aus gummiertem Textilgewebe oder Leder gefertigt werden. Schlupf und Elastizität der Hüllelemente wirken stoß- und schwingungsdämpfend. Die übertragbare Leistung ist abhängig vom Querschnitt, der Reibung und dem Umschlingungswinkel, der durch Spannrollen (vgl. Abb. 9.1.7-5) vergrößert werden kann. Nach der Form des Hüllelements unterscheidet man Flachriemen-, Keilriemen-, Seil- und Kettentriebe. *Seiltriebe* sind nur für kleine Kräfte geeignet. *Keilriemen* eignen sich besonders für große Kräfte, verlangen jedoch parallele Achslage. *Kettentriebe* nehmen eine Mittelstellung zwischen Zahnrad- und Riementrieben ein. Sie übertragen schlupffrei große Leistungen bei großem Achsabstand durch eine formschlüssige Verbindung zwischen Kettenrad und Kette (vgl. 10.1.2.), die als *Hülsen-*, *Rollen-* oder *Zahnkette* ausgebildet ist.

Stelltriebe. *Reibradtriebe* übertragen Drehmomente ohne formschlüssige Elemente durch Reibung. Durch Änderung der Stellung der Reibräder zueinander (Abb. 9.1.7-6) kann über den Verstellweg das Übersetzungsverhältnis *stufenlos* geändert werden. Die übertragbare Leistung wird durch den Reibwert begrenzt. Der maximale Stellbereich ist allgemein 3 bis 6 pro Stellelement. Reibradgetriebe sind ohne Kupplung lastschaltbar. Sie erlauben eine Drehrichtungsumkehr (Abb. 9.1.7-7) und schützen sich selbst durch Schlupf gegen Überlastung. Auch Hülltriebe sind als Stelltriebe ausführbar. Beim *Breitkeilriemengetriebe* wird der treibende Durchmesser durch axiales Verschieben der Riemenscheiben-

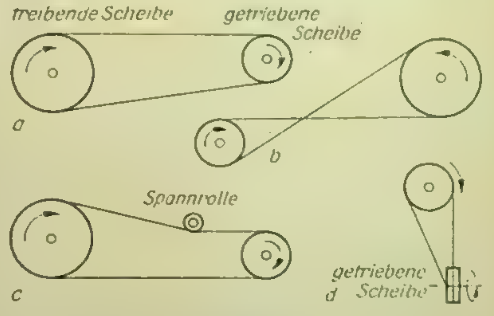


Abb. 9.1.7-5 Riementriebe: a offen, b gekreuzt, c mit Spannrolle, d Winkeltrieb

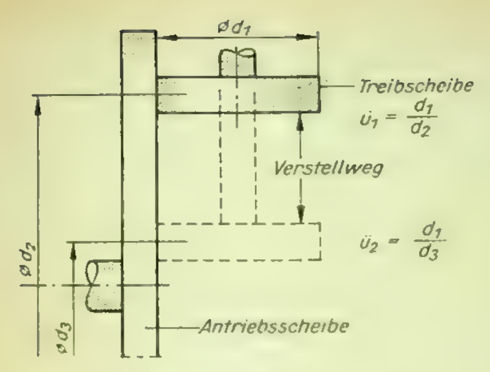


Abb. 9.1.7-6 Reibradtrieb

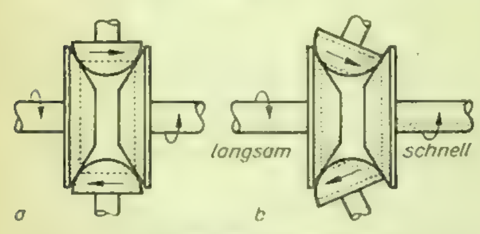


Abb. 9.1.7-7 Stufenloser Reibradtrieb mit Zwischenrad bei gleicher (a) und unterschiedlicher Drehzahl (b)

halften verändert (Abb. 9.1.7-8). Der Ausgleich des veränderten Achsabstands erfolgt durch eine gleichgroße Gegenbewegung der getriebenen Scheibe. Anstelle des flexiblen Riemens kann ein Metallring verwendet werden.

Kurbeltriebe wandeln eine Drehbewegung in eine hin- und hergehende Bewegung um, z. B. die Drehbewegung eines Elektromotors in die translatorische Tischbewegung einer Werkzeugmaschine. Umgekehrt kann eine hin- und hergehende Bewegung, beispielsweise einer Dampfmaschine oder eines Verbrennungsmotors (vgl. Abb. 2.6.2-2), in eine Rotationsbewegung umgewandelt werden. Nach Art der kinematischen Lösung unterscheidet man z. B. *Kurbel-*, *Koppel-*, *Kreuzschleifen-* und *Schubkurbeltriebe*. Letztere haben im Maschinenbau in Pumpen, Verdichtern, Verbrennungsmotoren, Werkzeug-, Land- und Verpackungsmaschinen die größere Bedeutung.

Flüssigkeitstriebe. *Hydrodynamische Triebe* (Abb. 9.1.7-9) nutzen zur Kraftübertragung die kinetische Energie einer Flüssigkeitsmenge. Sie muß eine hohe Dichte haben, um die Strömungsverluste klein zu halten. Das der Antriebswelle aufsitzende *Pumpenrad* wandelt die zugeführte Leistung in Strömungsenergie der Flüssigkeit um, die im Kreislauf durch das Getriebe strömt. Durch das mit der Abtriebswelle fest verbundene *Turbinenrad* wird der Flüssigkeit die kinetische Energie entzogen und kann von der Abtriebswelle als Drehmoment abgenommen werden. Das zwischen Pumpen- und Turbinenrad fest eingebaute *Leitrad* mit verstellbaren Schaufeln gewährleistet ein gleichmäßiges Zuströmen der Flüssigkeit zum Pumpenrad. Solche Getriebe finden besonders in schweren Fahrzeugantrieben, wie für Diesellokomotiven, als Wandler Anwendung.

9.1.8. Schmierungstechnik

Bei der gegenläufigen Bewegung zweier Körper oder Stoffe entsteht an der Kontaktstelle *Reibung*, die proportional dem vorhandenen Flächendruck und dem durch den *Reibwert* definierten Reibverhalten der sich berührenden Stoffe ist. Obgleich durch die Reibung Wärme und Verschleiß entstehen, beruhen viele Vorgänge in Technik und Natur – wie etwa das Laufen des Menschen oder das Bremsen des Kraftfahrzeugs – auf dem Vorhandensein der Reibung. In vielen Fällen jedoch ist die Reibung unerwünscht und verschlechtert den Wirkungsgrad. In der Technik gilt das besonders für Führungen und Lagerungen von Maschinenelementen und die zwischen Werkzeug und Werkstoff beim Spanen auftretenden Reibkräfte (vgl. Schleifen, 8.3.2.).

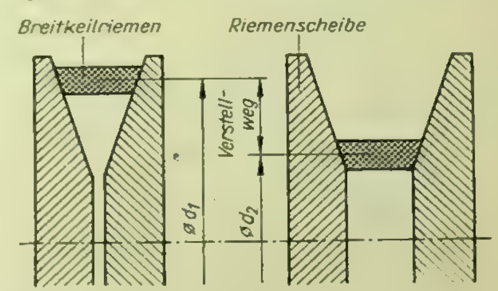


Abb. 9.1.7-8 Stufenloses Breitkeilriemengetriebe

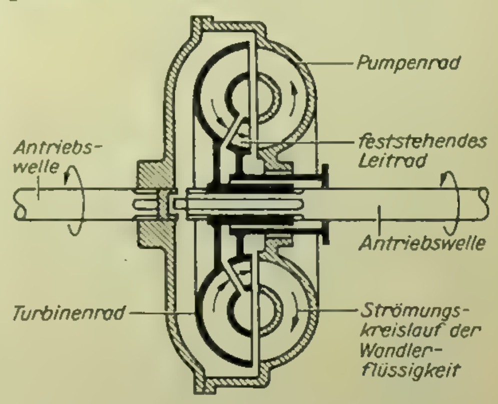


Abb. 9.1.7-9 Hydrodynamischer Trieb (Flüssigkeitstrieb)

Schmiermittel werden zur Minderung unerwünschter Reibung eingesetzt. Sie setzen die Reibung herab und führen Reibungswärme ab. Die bekanntesten Vertreter sind die *Schmieröle* und *-fette*. Es gibt sie in verschiedenen Viskositäten, Mischungen und qualitätsfördernden Beimengungen, den Additivs. Neben flüssigen Schmiermitteln sind auch feste Stoffe, wie Graphit, Molybdändisulfid, oder verschiedene Kunststoffe, Aerosole, z. B. Ölnebel, oder gasförmige Schmiermittel, im einfachsten Fall Luft, mit gutem Erfolg einsetzbar (vgl. 8.5.3.).

Schmierungsarten. Wälzlagerungen kommen i. allg. mit einer *Fettdauerschmierung* aus. Gleitlagerungen benötigen zur einwandfreien, verschleißarmen Funktion einen tragfähigen *Schmiermittelfilm* zwischen feststehendem und bewegtem Maschinenteil (vgl. 9.1.3., Abb. 9.1.3-2).

Frischölschmierung. Das Schmiermittel wird ständig in ausreichender Menge zugeführt, um den Schmierfilm aufrechtzuerhalten.

Verlustschmierung wird bei geringem Schmiermittelbedarf angewendet. Das Schmiermittel wird über *Schmiernippel* für Öle oder Fette mittels Fettpressen zugeführt; ein Kugelventil verhindert das Eindringen von Schmutz. Eine kontinuierliche oder feinere Dosierung wird durch *Öltropfapparate* (Abb. 9.1.8-1) erreicht.

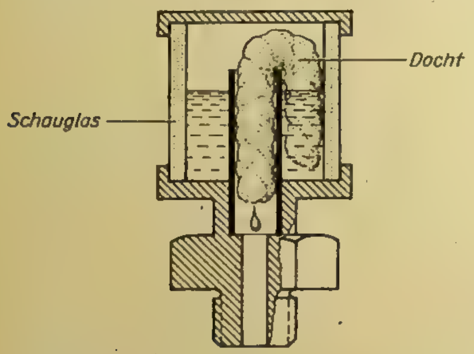


Abb. 9.1.8-1 *Öltropfapparat mit Dochtschmierung*

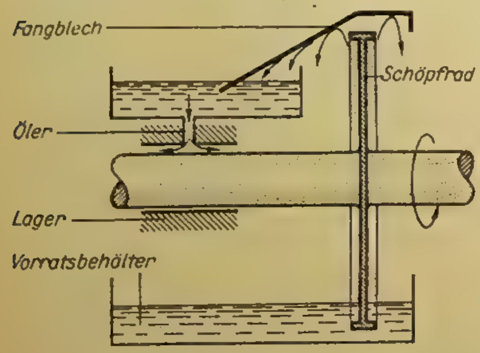


Abb. 9.1.8-2 *Schleuderschmierung*

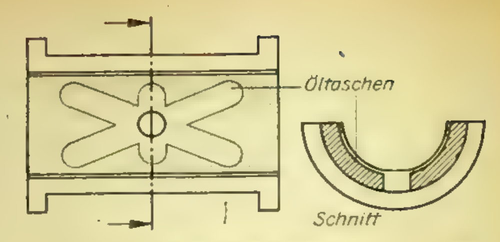


Abb. 9.1.8-3 *Ölverteilernuten in einer Lagerschale*

Zentralschmierung wird in modernen Aggregaten angewendet. Eine zyklisch betätigte Pumpe fördert über Zumeßventile und Rohrleitungen die jeweils notwendige Schmierstoffmenge an die einzelnen Schmierstellen.

Umlaufschmierung ist für Wellenlagerungen erforderlich. Eine einfache Form ist die *Schleuderschmierung* (Abb. 9.1.8-2), wobei ein Schöpfrad aus einem Vorrats- und Sammelbecken, dem Ölsumpf, das Öl in einen über der Schmierstelle liegenden Behälter fördert, von dem aus durch die Schwerkraft und die Saugwirkung des Lagers das Schmieröl der Lagerstelle zugeführt wird. Die Verteilung im Lager selbst erfolgt durch die *Schmiernuten* (Abb. 9.1.8-3), die nicht an die Stelle des Druckaufbaus des Ölfilms gelegt werden dürfen. Stark belastete Gleitlagerungen arbeiten mit einer *Druckschmierung*, wobei der Schmierölumlauf durch eine Ölpumpe bewirkt wird, mit der Ölmenge und -druck festgelegt werden können. Eine solche Ölversorgungsanlage kann durch *Filter* und *Ölkühler* ergänzt werden.

9.1.9. Rohrleitungen und Armaturen

Das Transport- und Verteilungssystem für Flüssigkeiten und Gase — mitunter auch für feste Stoffe — wird aus Rohrleitungen und Armaturen aufgebaut. Transport und Verteilung erfolgen durch Rohre; Armaturen übernehmen die Dosierung und Absperrung.

Rohrleitungen. Rohre sind weitgehend standardisiert. Hauptkenngrößen sind *Nenndruck* (*ND*) und *Nennweite* (*NW*). Als Werkstoffe werden Stahl, Grauguß, NE-Metalle, Plaste, Glas und Keramik verwendet. Hauptsächlich werden nahtlos gewalzte oder geschweißte Stahlrohre eingesetzt. Die *Rohrverbindungen* sind abhängig von Nennweite und -druck sowie vom verwendeten Material. Sie können lösbar sein, wie Verschraubungen, oder unlösbar, wie Schweiß-, Löt- oder Klebeverbindungen. Hauptsächliche lösbare Verbindungselemente sind *Schneidring-Rohrverschraubungen* (Abb. 9.1.9-1) und bei größeren Durchmessern *Flanschverbindungen*. Feste Flansche werden angegossen oder an-

geschweißt, lose Flansche werden aufgeschraubt (Abb. 9.1.9-2). Die Verbindungsstellen müssen mit Weich- oder Metalldichtungen gedichtet werden. Rohre aus Plasten oder NE-Metallen, z. B. Bleirohre, werden häufig gemufft, in dem das eine Rohrende in das geweitete andere Rohrende gesteckt wird. Zur Zuführung von Flüssigkeiten an bewegte Objekte werden meist *Schläuche* aus Gummi oder Metall als Nieder- und Hochdruckschläuche eingesetzt. Zur Umlenkung, Aufteilung oder bei Änderungen der Strömungsquerschnitte werden *Rohrformstücke*, wie Krümmer, Winkel-, Kreuz-, T- und Reduzierstücke, verwendet. *Dehner*, als Rohrbogen, Wellrohr oder Stopfbuchsendehner ausgeführt, kompensieren die Wärmedehnung bei der Förderung heißer Medien. Für die Über-

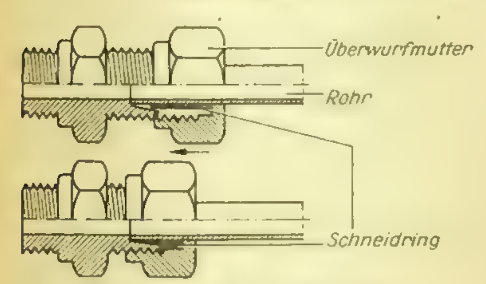


Abb. 9.1.9-1 Lösbare Schneidring-Rohrverschraubungen

wachung der Betriebsparameter werden Meßgeräte für Druck, Temperatur und Durchflußmenge eingesetzt, für deren Veränderung Armaturen.

Armaturen. *Selbsttätige Armaturen* entnehmen die zum Stellvorgang notwendige Energie dem Strömungsmittel selbst. Sie reagieren auf Druck- oder Richtungsänderungen der Strömungen, z. B. Rückschlagklappe oder -ventil.

Nichtselbsttätige Armaturen benötigen zu ihrer Betätigung eine Fremdenergie und werden von Hand, über Arbeitskolben oder Elektromotor verstellt.

Hähne sperren oder vermindern den Förderstrom durch eine drehende Absperrbewegung quer zur Stromrichtung. Das keglige Verschlußstück wird Hahnkücken genannt. Hähne werden bei niedrigen Drücken und kleineren Querschnitten eingesetzt, z. B. als Hauptgashahn im Haushalt.

Ventile führen ihre Absperrbewegung senkrecht zur Dichtfläche und in Stromrichtung aus. Je nach Betätigung unterscheidet man *Absperrventile*, bei denen das Verschlußstück durch eine Spindel abgehoben wird, *selbsttätige Ventile* mit Verschlußbetätigung durch den Förderstrom und *gesteuerte Ventile*, bei denen das Verschlußstück durch besondere Steuerorgane, z. B. eine Nockenwelle, programmiert betätigt wird. Weitere Ventilformen sind *Sicherheitsventile*, die bei Überschreiten eines eingestellten Drucks selbsttätig öffnen, oder *Druckminderventile*, die einen eingestellten Druck konstant halten.

Klappen schließen durch eine Schwenkbewegung um eine Achse senkrecht zur Stromrichtung, z. B. Rückschlag- und Drosselklappen (Abb. 9.1.9-3).

Schieber führen das Absperrorgan entlang der Dichtungsfläche und senkrecht zur Stromrichtung. Sie werden bei großen Nennweiten und Drücken eingesetzt. Große Schieberventile besitzen ein Druckausgleichsventil zur Reduzierung der Bewegungskräfte am Schieber.

9.2. Hydrostatische und pneumatische Steuerungen und Antriebe

Die Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte in ruhenden Flüssigkeiten wird *Hydrostatik* genannt. Die *Pneumostatik* behandelt diese Gesetzmäßigkeiten in ruhenden Gasen. In der Umgangssprache werden hierfür die Begriffe *Hydraulik* und *Pneumatik* benutzt, die gleichzeitig auf hydrostatische und pneumatische Steuerungen und Antriebe angewendet werden. In der Hydraulik wird allgemein Öl als Energieträger eingesetzt, bei der Pneumatik wird dazu Luft verwendet.

Die technischen Vorteile dieser Systeme führten zu einer häufigen Anwendung in Steuerungen und Antrieben für Werkzeugmaschinen (vgl. Abb. 8.3.2-12), im Fahrzeugbau, Schiffsbau, Landmaschinenbau, Walzwerkbau, Chemieanlagenbau oder in der Fördertechnik. Sie haben

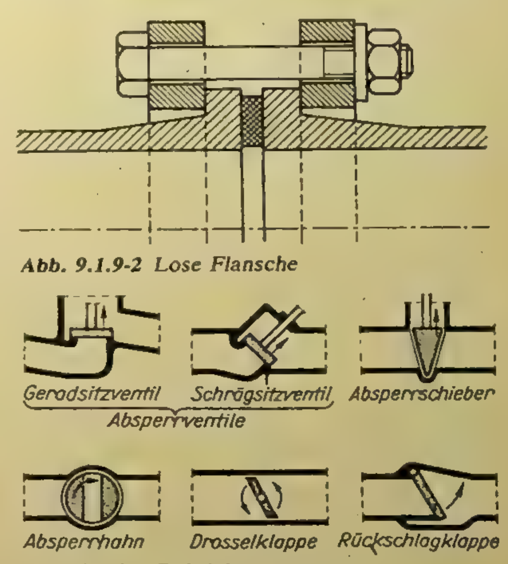


Abb. 9.1.9-2 Lose Flansche

Abb. 9.1.9-3 Rohrleitungsarmaturen

weiter große Bedeutung als geeignete Mittel für die Mechanisierung und Automatisierung auf technischem Gebiet.

9.2.1. Gesetzmäßigkeiten der Hydro- und Pneumostatik

In Flüssigkeiten und Gasen breitet sich der Druck p gleichmäßig nach allen Seiten aus. Abb. 9.2.1-1 verdeutlicht diesen Sachverhalt. In einem Zylinder befindet sich abgedichtet ein Kolben mit Kolbenstange. Der anstehende Druck p pflanzt sich gleichmäßig nach allen Seiten in der Flüssigkeit oder im Gas fort und drückt damit auf die Zylinderwandung und den Kolbenboden. An der Kolbenstange ist eine Kraft F abnehmbar, die dem Produkt aus Kolbenfläche A und Druck p entspricht. Eine Druckdifferenz, wie zwischen beaufschlagter Kolbenfläche und nicht beaufschlagter Kolbenstangenseite, führt zu einer Strömung und damit zu einem Energietransport P, der dem Druck p und dem Förderstrom Q proportional ist, $P = p \cdot Q$.
Wegen der relativ kleinen Strömungsgeschwindigkeiten in hydrostatischen Anlagen bzw. der geringen Masse der Druckluft in pneumostatischen Anlagen kann die Strömungsenergie i. allg. vernachlässigt werden.

9.2.2. Charakteristische Merkmale

Die Gesetzmäßigkeiten der Hydro- und Pneumostatik ermöglichen es, mit kleinen Anlagen und geringem Raumbedarf große Kräfte zu übertragen. Dabei können mittels Rohrleitungen oder Schläuchen größere Entfernungen einfach und betriebssicher überbrückt werden. Die Parameter Kraft, Geschwindigkeit, Drehmoment oder Drehzahl können in engen Grenzen und stufenlos eingestellt und unter Belastung verändert werden. Der Stellbereich für diese Leistungswerte ist so groß, daß die Antriebe ohne Schaden selbst bis zum Stillstand, überlastet werden können. Das maximale Anlaufmoment beispielsweise eines Hydromotors entspricht seinem Nennmoment, so daß ein Lastanlauf ohne

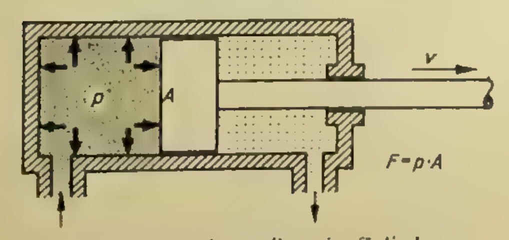


Abb. 9.2.1-1 Druckverteilung im Zylinder

mechanische Kupplung möglich ist. Geradlinige Bewegungen können durch einen einfachen Arbeitszylinder ausgeführt werden, wobei eine Umkehr der Bewegungsrichtung ebenso einfach erreicht wird, wie die Wandlung einer rotatorischen in eine translatorische Bewegung und umgekehrt. Für den Aufbau von kompletten Anlagen steht eine Vielzahl von Bauelementen mit vorgegebenen Funktionen zur Verfügung.
Pneumatische Antriebe verwenden als Arbeitsmittel Luft, die billig und unbegrenzt zur Verfügung steht. Damit entfallen sonst benötigte Rückleitungen. Die Luft hat weiter den Vorteil, daß sie explosions- und kurzschlußsicher arbeitet sowie hohe Schalt- und Arbeitsgeschwindigkeiten ermöglicht. Ein wesentlicher Nachteil ist allerdings die *Kompressibilität*, d. h. ihre Zusammendrückbarkeit bei Druckbelastung. Dadurch sind konstante Arbeitsgeschwindigkeiten nur bedingt erreichbar. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist auch eine Begrenzung des Einsatzgebiets bis zu Kräften von 30 kN gegeben.
Diese Nachteile lassen sich durch die Kombination mit hydrostatischen oder mit elektrischen und mechanischen Bauelementen vermeiden. Der leistungsarme Steuerungsteil einer Anlage besteht z. B. aus elektrischen oder pneumatischen Elementen, während der Kraft- oder Leistungsteil mit hydraulischen Bauelementen ausgeführt wird. Pneumatische Bauelemente der *Normaldrucktechnik* arbeiten mit 20 bis 140 kPa Überdruck, die der *Niederdrucktechnik* mit 0,1 bis 10 kPa Überdruck. Systeme der Niederdrucktechnik enthalten meist keine beweglichen Teile. Ihr Einsatzgebiet liegt insbesondere im Bereich hoher Temperaturen, wo elektrische oder hydraulische Systeme versagen. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit der eingegebenen Kommandos beträgt in Niederdruckanlagen 1 bis 2 m/s pro Schaltelement und ist damit in den meisten Fällen ausreichend. Durch pneumatisch-elektrische (PE-) und elektrisch-pneumatische (EP-)Wandler ist eine Fernübertragung von Signalen möglich.
Breite Anwendung hat die Pneumostatik auch im betrieblichen Meßwesen gefunden, wobei insbesondere Längenmeßgeräte auf pneumatischer Basis eingesetzt werden. Mit solchen Meßsteuergeräten können beispielsweise Spanungsprozesse überwacht und gesteuert werden.
Hydrostatische Antriebe, insbesondere auch in der Kombination als pneumohydraulische Vorschubeinrichtung, werden wegen ihrer hohen Gebrauchswerteigenschaften in Werkzeugmaschinen (Tafel 36), wie Dreh-, Bohr- oder Fräsmaschinen, eingesetzt. Sie vereinen die Vorteile der Hydraulik mit denen der Pneumatik. Die Antriebsenergie wird dem Druckluftnetz entnommen und die Gleichförmigkeit der Vorschubbewegung durch einen hydraulischen Arbeitszylinder erzielt. Diese Antriebe erreichen sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Gleichförmigkeit der Bewegung, der Automatisierbarkeit des

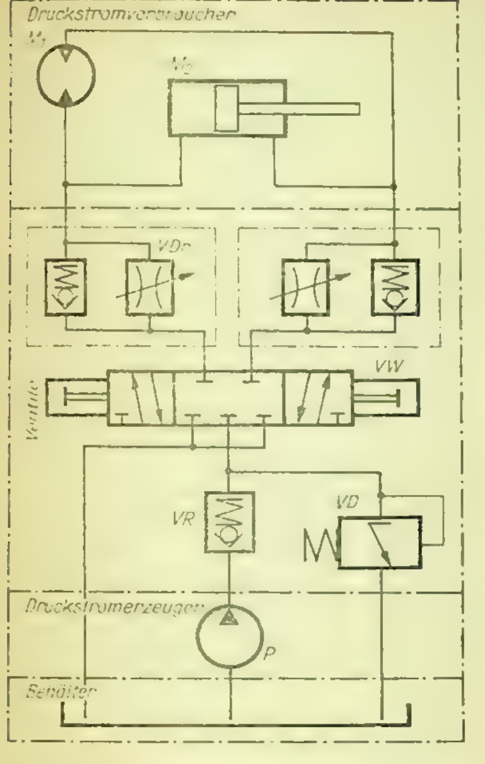


Abb. 9.2.3-1 Hydrostatische Anlage (Schema)

Bewegungsablaufs, wie im Eilvorlauf, Arbeitsgang und Eilrücklauf, und des Platzbedarfs.

9.2.3. Hydro- und pneumostatische Anlagen

Hydrostatische Anlagen. Aus einem Baukasten von Funktionselementen können hydro- oder pneumostatische Anlagen oder Kombinationen beider aufgebaut werden. Bauelemente hydrostatischer Anlagen sind: *Druckstromerzeuger* (Pumpen *P*), *Steuer-* und *Regelgeräte* (Wegeventile *VW*, Druckventile *VD*, Stromstellventile *VDr*, Rückschlagventile *VR*), *Druckstromverbraucher* (Rotationsmotor M_1, Arbeitskolben M_2). In Verbindung mit dem Flüssigkeitsbehälter, dem Energieträger und den Leitungselementen bilden sie eine Arbeitsanlage (Abb. 9.2.3-1). Energieträger oder Arbeitsmittel sind i. allg. Mineral- oder Syntheseöle, Wasser, Emulsionen, Glyzerin u. a. spezielle Flüssigkeiten.

Pneumostatische Anlagen enthalten *Druckstromerzeuger* (Verdichter), *Druckstromverbraucher* (Rotationsmotore, Arbeitszylinder), *Steuer-* und *Regelgeräte* (Ventile) und *Leitungen.* Die Luft wird allgemein über Filter direkt aus der Atmosphäre dem Verdichter zugeleitet, so daß ein Behälter entfällt. In diesen Anlagen arbeiten Druckstromerzeuger und -verbraucher als *Leistungswandler.* Die Pumpe bzw. der Verdichter wird von einem Elektromotor angetrieben und wandelt die mechanischen Parameter Drehmoment und -zahl in die hydro- bzw. pneumostatischen Parameter Druck und Förderstrom um. Sie können mit einem mehr als 1:100 veränderlichen Übersetzungsverhältnis wieder in ein Drehmoment, eine Drehzahl oder über einen Arbeitszylinder in eine Kraft oder Geschwindigkeit zurückgewandelt werden. Das abgegebene Drehmoment ist dem Druck des Energieträgers und dem Schluckvolumen des Motors proportional, die Drehzahl ist dem zugeführten Förderstrom proportional und dem Schluckvolumen des Motors umgekehrt proportional.

Druckstromerzeuger. ***Pumpen*** als hydrostatische Druckstromerzeuger dienen der Erzeugung des Drucks bzw. der Fördermenge (vgl. 2.6.6.). Sie sind eingeteilt nach dem Maschinenelement, dessen Funktion wesentlich den Förderraum und damit die Fördermenge bildet wie z. B. die Kolbenpumpe. Sie können auch gegliedert werden nach der Verstellmöglichkeit der Fördermenge in ***Konstant-*** und ***Verstellpumpen,*** nach der Saugfähigkeit in selbstansaugende und

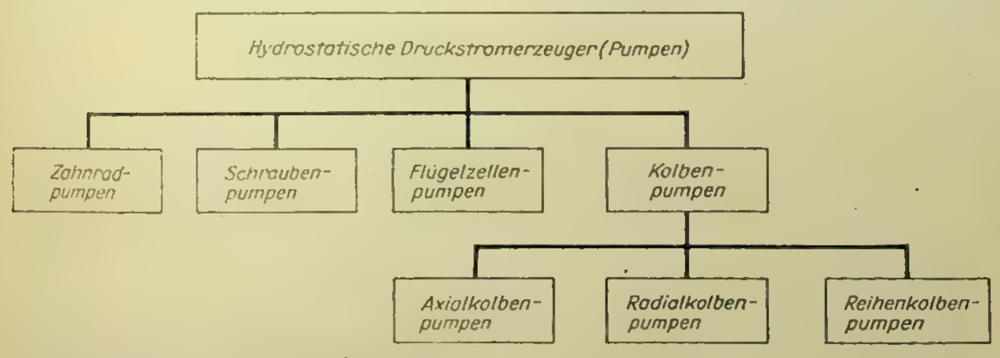


***Abb. 9.2.3-2** Hydrostatische Druckstromerzeuger*

in nicht selbstansaugende Pumpen und nach der Zahl der Förderströme in *Einstrom-* und *Mehrstrompumpen.* Jede dieser Bauarten hat spezifische Vorteile hinsichtlich Fördermenge, -druck, Verstellbarkeit, Laufruhe, Platzbedarf, Einbaubedingungen, Eigenmasse und Aufwendigkeit, die bei der Auswahl zu berücksichtigen sind (Abb. 9.2.3-2).

Zahnradpumpen sind häufig verwendete Konstantpumpen in Ein- und Mehrstrombauweise. Ihre Vorteile sind Robustheit und geringe Abmessungen. Nachteilig kann der pulsierende Förderstrom wirken. Zur Wirkungsweise vgl. 2.6.6.

Schraubenpumpen arbeiten demgegenüber nahezu vibrationsfrei und werden deshalb häufig im Präzisionsmaschinenbau eingesetzt. Sie enthalten 2 oder mehr ineinander rotierende Schraubenspindeln (Abb. 9.2.3-3). Dabei bilden 2 Gänge einer Spindel, ein Gang der Gegenspindel und das Pumpengehäuse jeweils einen abgeschlossenen Raum, der sich bei Drehung der Spindeln stetig in axialer Richtung vom Saugzum Druckraum bewegt. Ihre Herstellung ist aufwendiger, die Fördermenge begrenzt.

Flügelzellenpumpen weisen einen zylindrischen Rotor auf, der exzentrisch im ebenfalls zylindrischen Gehäuse gelagert ist (Abb. 9.2.3-4). Der Fördermengentransport erfolgt in Kammern, die durch im Rotor gelagerte Flügel und die Gehäusewand gebildet werden. Bei Drehung des Rotors erfolgt saugseitig eine Vergrößerung des Kammervolumens und druckseitig eine allmähliche Verringerung. Diese Pumpen sind als Konstant- oder Verstellpumpen gebaut. Bei Veränderung der Exzentrizität wird das Volumen pro Förderzelle verändert.

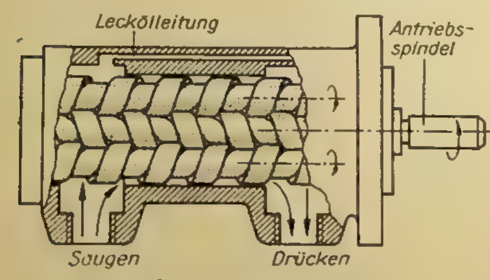


Abb. 9.2.3-3 *Schraubenpumpe*

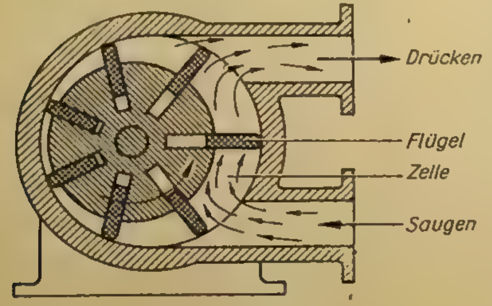


Abb. 9.2.3-4 *Flügelzellenpumpe*

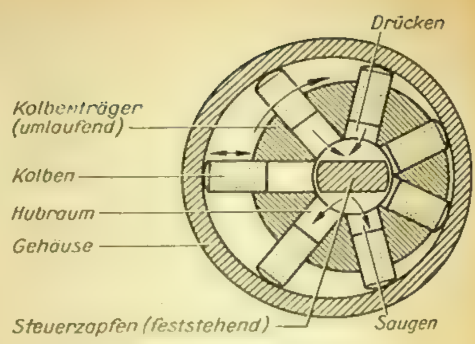


Abb. 9.2.3-5 *Radialkolbenpumpe*

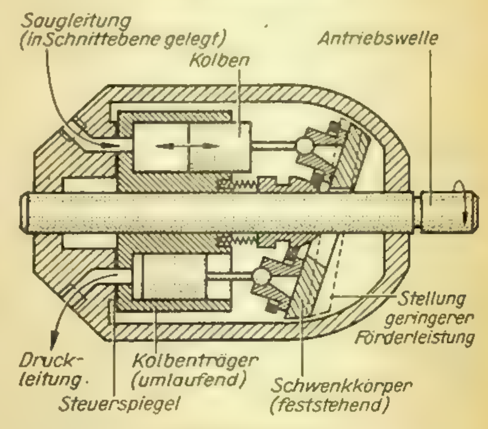


Abb. 9.2.3-6 *Axialkolbenpumpe*

Kolbenpumpen werden als Konstant- oder Verstellpumpen ausgeführt. *Radialkolbenpumpen* (Abb. 9.2.3-5) ähneln in ihrem Aufbau Flügelzellenpumpen. Die Beaufschlagung mit Öl erfolgt jedoch hier durch die Rotorachse. Die Saug- und Druckräume werden durch Kolben gebildet, die sich am Gehäuse abstützen. Führungs- und Zentrifugalkräfte bewirken die hin- und hergehende Bewegung der Kolben. Größe und Veränderung der Exzentrizität verändern die Fördermenge.

Axialkolbenpumpen haben parallel zur Längsachse in einem mit der Antriebswelle verbundenen Kolbenträger mehrere Kolben, die mit ihrer Kolbenstange in einer schief- und feststehenden Scheibe gelagert sind (Abb. 9.2.3-6). Bei umlaufender Antriebswelle erfolgt die Pumpbewegung der Kolben, deren Hub vom Radius und dem Schiefstellungswinkel der Scheibe bestimmt wird. Solange sich die Kolben aus dem Kolbenträger herausbewegen, sind sie über eine synchron laufende Steuerung mit der Saugleitung verbunden, bei Umkehr der Bewegungsrichtung jedoch mit der Druckleitung.

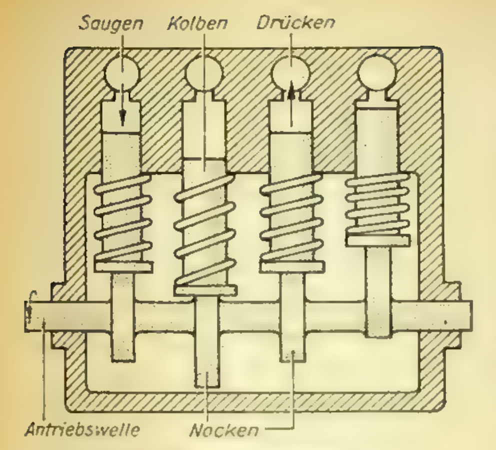


Abb. 9.2.3-7 *Reihenkolbenpumpe*

Reihenkolbenpumpen (Abb. 9.2.3-7) haben ihren Namen nach der reihenförmigen Anordnung der Kolben. Sie werden in der einen Hubrichtung von einer Nockenwelle, in der anderen durch Federkräfte bewegt. Der Ölstrom wird durch Ventile gesteuert.

Verdichter sind pneumostatische Druckerzeuger. Eine bekannte pneumostatische Anlage ist das *Druckluftnetz*, über das jeder moderne Produktionsbetrieb verfügt. Der Netzdruck beträgt meist 0,6 MPa und wird durch pneumostatische Druckerzeuger in einer zentralen Verdichteranlage, dem Kompressorenraum, erzeugt. Pneumostatische Anlagen und Steuerungen an Maschinen und Aggregaten arbeiten meist ohne eigenen Verdichter und werden aus dem Netz gespeist, wenn die Leistung der vorhandenen Verdichterstation ausreicht. Zu Bauarten und Wirkungsweise vgl. 2.6.6.

Druckstromverbraucher. ***Hydrostatische Druckstromverbraucher***, auch *Hydromotoren* genannt, lassen sich nach Bewegungsform und Wirkbauelementen einteilen (Abb. 9.2.3-8). Die bereits beschriebenen Zahnrad-, Flügelzellen- und Kolbenpumpen können auch als *Rotationsmotoren* eingesetzt werden. Durch Beaufschlagung mit einem Druckölstrom werden sie in Rotation versetzt und erzeugen ein der Drehzahl proportionales Drehmoment.

Drehflügelmotoren (Abb. 9.2.3-9) gehören zu den Drehwinkelmotoren. Während sie nur eine hin- und herdrehende Bewegung von $< 360°$ ausführen, können mit anderen Konstruktionsprinzipien, wie *Kolben-Zahntrieb-Motoren*, auch mehrere Umdrehungen erreicht werden.

Arbeitszylinder sind sehr häufig benutzte Antriebe. Sie führen geradlinige Bewegungen aus. Tauch- oder Plungerkolben (Abb. 9.2.3-10) dienen vorzugsweise zum Lastenheben. Die Rückführung des Kolbens übernimmt die äußere Belastungskraft F. Doppeltwirkende Arbeitszylinder (Abb. 9.2.3-11) haben einen dicht passenden Kolben, der wahlweise rechts oder links beaufschlagt werden kann. Zu- und Ablauf und ihre Umkehr werden von Ventilen gesteuert.

Pneumostatische Druckverbraucher gibt es ebenfalls in den Bauarten Rotations- und Drehwinkelmotoren. Bei den Rotationsmotoren herrschen die Flügelzellen- und Kolbenmotoren vor. Sie finden u. a. als Antriebe in transportablen

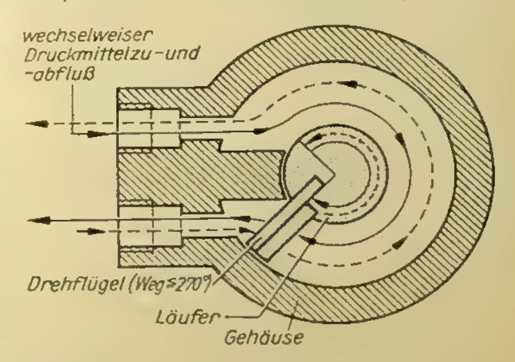


Abb. 9.2.3-9 *Drehflügelmotor*

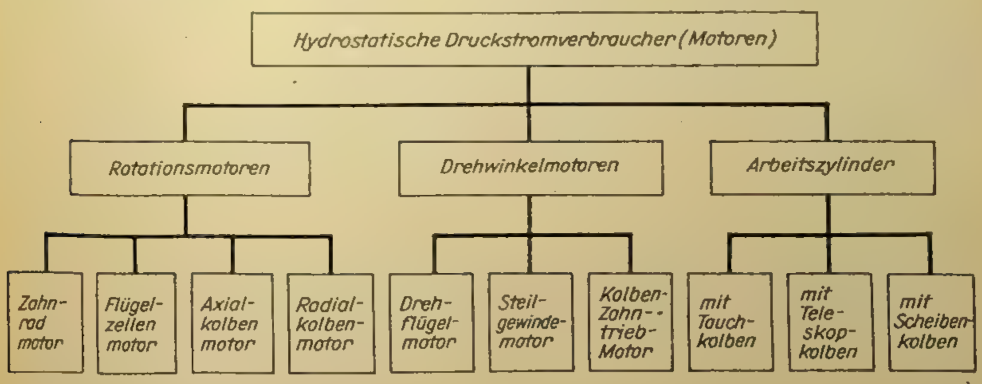


Abb. 9.2.3-8 *Hydrostatische Druckstromverbraucher*

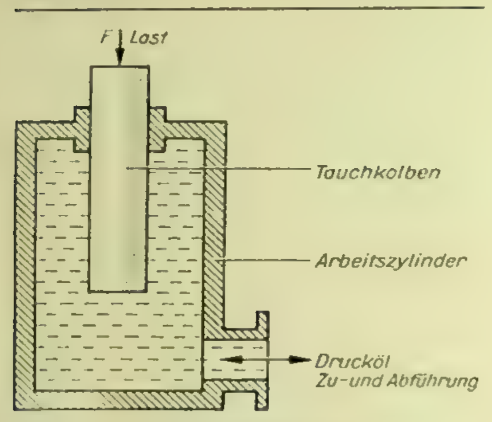


Abb. 9.2.3-10 *Tauchkolbenantrieb*

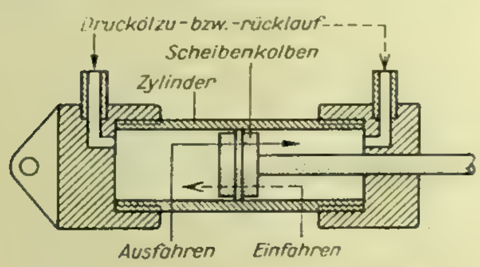


Abb. 9.2.3-11 *Arbeitszylinder mit Scheibenkolben*

Bohr- oder Schleifmaschinen Verwendung, vermögen jedoch auch größere Leistungen (20 kW) zu erzeugen, wie sie sie als Lüftermotore oder als Antriebe für Winden benötigen. Zur Erhöhung des Drehmoments werden sie mit einem Zahnradgetriebe kombiniert, mit dem sie oft in Kompaktbauweise verbunden sind.

Pneumostatische Arbeitszylinder werden als *Schlagzylinder* beim Hochgeschwindigkeitsumformen von Metallen verwendet (vgl. 8.2.6.). Durch die schlagartige Expansion eines vorgespannten Luftvolumens wird der Kolben des Schlagzylinders bis auf ≈ 7,5 m/s Endgeschwindigkeit beschleunigt und erhält damit eine hohe kinetische Energie.

Ventile. Zur Steuerung und Regelung in hydro- und pneumostatischen Antrieben und Anlagen werden Wege-, Druck-, Strom- und Sperrventile verwendet. Sie können die Flußrichtung, den Druck oder die Strommenge steuern.

Wegeventile leiten den Druckmittelstrom in eine vorgegebene Richtung, teilen oder unterbrechen ihn.

Kolbenlängsschieberventile sind nach einem Baueinheitssystem genormt und untereinander verkettbar. Sie enthalten die Funktionsgruppen Steuer-, Stell- und Zusatzeinheit.

Die *Steuereinheit* enthält das Schaltelement (Kolbenlängsschieber), das bei seiner Längsverschiebung im Steuergehäuse in den verschiedenen Schaltstellungen unterschiedliche Verbindungen der angeschlossenen Leitungen herstellt (Abb. 9.2.3-12). In der gezeichneten Schaltstellung 1 des Steuerkolbens sind D_1 mit Z_1 und Z_2 mit A_2 verbunden. Nach Umsteuern des Drucköls N_2 wird der Steuerkolben nach links gedrückt und A_1 mit Z_1 und D_1 mit Z_2 verbunden. Die Betätigung des Steuerkolbens erfolgt durch die stirnseitig angebrachten Stelleinheiten, die wie im Bild mit einem Druckkolben arbeiten bzw. durch Hand-, Federkraft oder mittels Elektromagnet verstellt werden.

Zusatzeinheiten (vgl. Abb. 9.2.3-12) dienen dem Anschluß der Rohr- oder Schlauchleitungen für die Zu- und Abführung des Druckmittels oder dessen Umlenkung und Verzweigung. Die Unterplatte ermöglicht die rohrlose Verbindung mehrerer Ventile zu Funktionsgruppen (*Unterplattenbauweise*). Je nach Zahl der möglichen Anschlüsse unterscheidet man Zwei- oder Mehrwegeventile. *Zweiwegeventile* dienen der Unterbrechung oder Herstellung von Leitungen. *Dreiwegeventile* z. B. der Steuerung einfach wirkender Arbeitszylinder, *Vier-* und *Fünfwegeventile* meist der Steuerung der Bewegungsrichtung von Druckstromverbrauchern.

Druckventile verhindern, daß der Druck in einer Anlage einen vorgegebenen, eingestellten Wert übersteigt. Sie dienen der Aufrechterhaltung eines Drucks, einer Druckdifferenz oder einer Druckminderung. In Abb. 9.2.3-13 wird der Steuerkolben durch die eingestellte Federkraft und die anliegende Ölsäule im Gleichgewicht gehalten. Bei steigendem Druck öffnet der Kolben durch eine Bewegung gegen die Federkraft den Abflußkanal, während bei fallendem Druck der abfließende Ölstrom stärker gedrosselt, d. h. der Kolben im Bild nach links bewegt wird.

Stromventile dienen zur Regulierung der Größe des Druckmittelstroms, z. B. zur Einstellung der

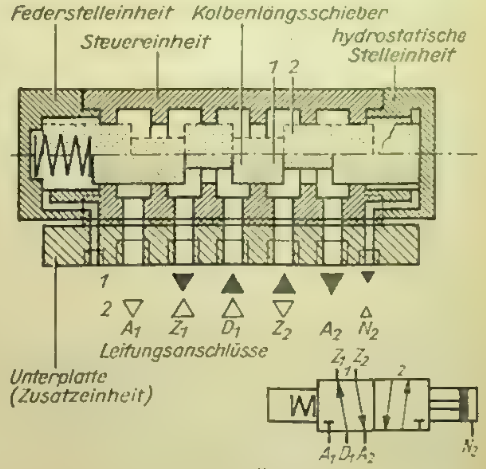


Abb. 9.2.3-12 *Wegeventil*

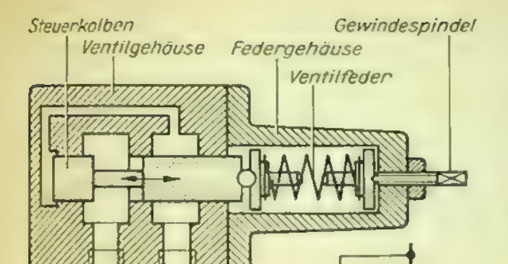


Abb. 9.2.3-13 Druckbegrenzungsventil (druckentlastet), rechts darunter Symbol

gewünschten Geschwindigkeit eines Arbeitskolbens. Bei *Drosselventilen* ist der Druckmittelstrom abhängig von der Größe des eingestellten Drosselquerschnitts, dem Druckgefälle zwischen Ein- und Ausgang des Ventils und der Viskosität des Druckmittels. Bei *Strombegrenzungsventilen* wird der Strom durch einen zusätzlichen Regelkolben unabhängig von Druckschwankungen im System konstant gehalten. *Stromteilventile* dienen der Aufteilung eines Druckmittelstroms in 2 definierte Teilströme.

Sperrventile (Abb. 9.2.3-14) sperren den Durchfluß in einer Richtung und öffnen gegen einen geringen Widerstand in der Gegenrichtung. Zu den Sperrventilen zählen *Rückschlagventile*, die als Sperre gegen einen ungewollten Druckabbau, zum Verhindern des Leerlaufens von Leitungen oder als Nachsaugeventil eingesetzt werden, *Doppelrückschlagventile*, die zur Verwirklichung der logischen Grundschaltungen UND oder ODER dienen, und *Rohrbruchventile*, die als Sicherheitseinrichtungen, z. B. in hydrostatischen Hebezeugen, eingesetzt werden.

Geräte und Zubehör. *Druckflüssigkeitsspeicher* nutzen das Energiespeichervermögen eines Gaspolsters, z. B. von Stickstoff, zur Förderung der Druckflüssigkeit aus. Nach Bauart werden *Kolben-*, *Membran-* oder *Blasenspeicher* (Abb. 9.2.3-15) unterschieden. In Anlagen, die nur kurzzeitig eine größere Energiemenge benötigen, kann eine kleine Pumpe mit geringerem Förderstrom in Verbindung mit einem Speicher vorteilhaft eingesetzt werden. Der Speicher wird in Zeiten geringeren Energiebedarfs wieder gefüllt. Druckflüssigkeitsspeicher dienen ferner zur Garantie einer Ölreserve bei Havarien, zum Ausgleich von Lecköl und zur Glättung von Druckspitzen und Pulsationen, wie sie z. B. durch Zahnradpumpen erzeugt werden.

Druckschalter signalisieren eine Druckänderung in der Anlage, so daß z. B. bei Druckabfall durch Leeren eines Druckflüssigkeitsspeichers die Pumpe eingeschaltet und bei Erreichen des gewünschten Druckes wieder abgeschaltet werden kann.

Filter dienen der Reinigung des Druckmittels von Fremdkörpern aus Abrieb oder Verunreinigungen. Dadurch wird der Gefahr des vorzeitigen Verschleißes, der Verstopfung oder Verklemmung und damit Havariefällen vorgebeugt. Bei pneumostatischen Anlagen wird das in der Luft enthaltene Wasser abgeschieden (Abb. 9.2.3-16), das sonst zu Korrosion, Verstopfungen und Ausfällen führen kann.

Die Bauelemente einer Anlage werden untereinander mit *Rohren* oder flexiblen *Schlauchleitungen* verbunden, die i. allg. aus Gewebegummi mit oder ohne Metallumspinnung zum Schutz gegen mechanische Beschädigung bestehen. Für die Anschlüsse werden Verschraubungen und Kupplungen benutzt.

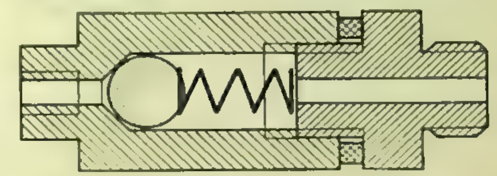


Abb. 9.2.3-14 Sperrventil

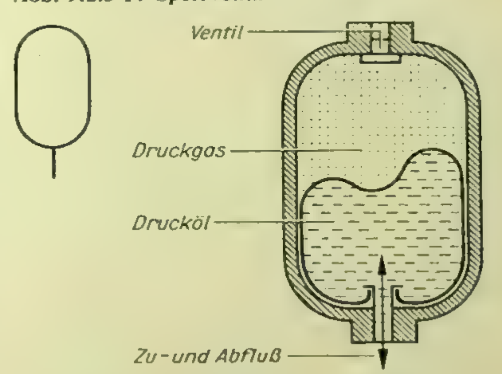


Abb. 9.2.3-15 Blasenspeicher, links Symbol eines Druckflüssigkeitsspeichers

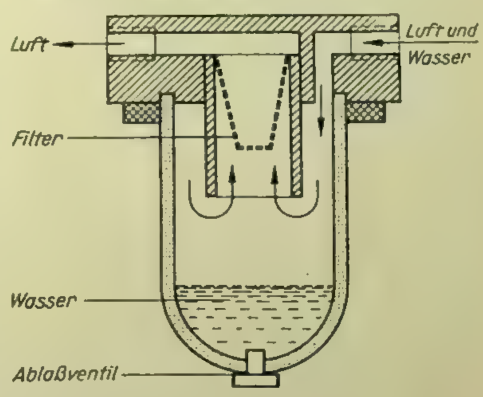


Abb. 9.2.3-16 Wasserabscheider

10. Fördertechnik

Die *Fördertechnik* befaßt sich mit der Entwicklung, Projektierung, Berechnung, Konstruktion, Montage und Instandhaltung von *Fördermitteln*. Sie sind die Arbeitsmittel zur Realisierung von Transport, Umschlag und Lagerung, kurz *TUL* genannt. Sind zur Lösung eines TUL-Prozesses mehrere Fördermittel notwendig, so bilden diese eine *Förderkette* oder *-anlage*. Historisch bedingt haben sich die *Verkehrsmittel*, wie Eisenbahn, Schiff, Kraftfahrzeug und Flugzeug, zu selbständigen Fachgebieten entwickelt. Der Transport von Flüssigkeiten und Gasen in Rohrleitungen wird ebenfalls nicht von der Fördertechnik behandelt.

Die Fördertechnik nimmt im gesamten Reproduktionsprozeß eine hervorragende Stellung ein, weil die Stoffe nicht direkt am Ort der Produktion gefunden werden. Sie müssen zur Produktionsstätte transportiert und die Produkte wieder an die Orte der Konsumtion gebracht werden. So sind Produktion und Distribution ohne Fördertechnik grundsätzlich undenkbar. Fördertechnische Aufgaben sind zu lösen bei der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen im unter- und übertägigen Bergbau, bei der Verarbeitung in Hüttenwerken, Zementfabriken, Chemiekombinaten, in Betrieben des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und Elektronik, des Bauwesens, der Leicht- und Lebensmittelindustrie, in Handel und Versorgung, im Post- und Fernmeldewesen, bei Dienstleistungen und in allen anderen Bereichen der Volkswirtschaft. Große Aufgaben stellt die Rationalisierung, Mechanisierung und Automatisierung der Produktionsprozesse.

Die Vielzahl der Aufgaben erfordert eine große Anzahl von Fördermitteln. Es sind waagerechte, geneigte oder senkrechte TUL-Prozesse zu verwirklichen und dabei Strecken, Flächen oder Räume zu überwinden.

Eine Grobgliederung nach der Arbeitsweise unterscheidet Stetig- und Unstetigförderer. Die *Stetigförderer* können bei kontinuierlicher Beschickung einen gleichmäßigen *Förderstrom* erzeugen. Sie arbeiten im Dauerbetrieb und benötigen bei gleichem Durchsatz einen geringeren Material- und Energieaufwand als die *Unstetigförderer*. Letztere sind notwendig für den Transport oder Umschlag von Einzellasten mit großen Massen oder großen Abmessungen. Sie arbeiten im Aussetzbetrieb und führen dabei Arbeitsspiele aus. Ein einfaches *Arbeitsspiel* besteht aus dem Aufnehmen, Transportieren und Wiederabsetzen der Last. Dann kehrt das Fördermittel in der Regel ohne Last zum Ausgangsort zurück, und es folgt eine *Arbeitspause*. Während eines solchen Arbeitsspiels werden Hub-, Dreh- und Fahrbewegungen ausgeführt. Spezielle Baugruppen mit elektrischem Einzelantrieb verwirklichen diese Bewegungen. Nur noch in spezieller Anwendung wird der Zentralantrieb, meist mit einem Dieselmotor, verwendet. Es gibt auch spezielle Maschinenelemente, die vorwiegend bei Fördermitteln verwendet werden.

Die Gliederung der Fördermittel nach einem einzigen Ordnungsprinzip führt wegen der Vielfalt immer zu Überschneidungen. Vorteilhaft ist daher eine Gliederung nach Bauformen (Tab. 10.0.0-1).

Den Arbeitsgegenstand bildet das *Fördergut*. In der Regel sind es Stoffe, für die auch die Begriffe Gut, Material, Ware o. a. verwendet werden. Auch Menschen werden mit Fördermitteln transportiert. Die Stoffe werden durch mechanisch-physikalische Eigenschaften gekennzeichnet. Das *Einzel-* oder *Stückgut* hat als charakteristische Merkmale die Masse, die Abmessungen und die Form. Darüber hinaus sind Temperatur, Empfindlichkeit gegen Druck oder Stoß u. a. von Bedeutung für deren Handhabung. Stückgüter werden vorwiegend von Unstetigförderern transportiert. Sie kommen vor als Kiste, Sack, Ballen, Gefäß bis hin zu Maschinenteilen oder komplet-

Tab. 10.0.0-1 *Grobgliederung der Fördermittel nach Bauformen*

Allgemeine Bauteile
Lastaufnahmemittel
Stetigförderer
Hebezeuge
Flurförderzeuge
Aufzugs- und Schachtförderanlagen
Gewinnungs- und Verkippungsmaschinen
Stand- und Hängebahnen
Kipper und Wipper

ten Maschinen. Das *Massen-* oder *Schüttgut* besitzt als charakteristische Eigenschaften die Korngröße und -form, die Kornzusammensetzung, die Schüttdichte, den Schüttwinkel, den Wassergehalt u. a. Diese Eigenschaften können sich bei Schüttgütern durch Umwelteinflüsse auch während des Transports verändern. Die Schüttgüter werden vorwiegend mit Stetigförderern transportiert. Dabei sind große Durchsätze möglich, die von Unstetigförderern nicht erreicht werden. Schüttgüter sind Sand, Steine, Zement, Kohle, Erze, Salze, Kleinteile, landwirtschaftliche Produkte, wie Getreide, Kartoffeln u. a.
Die Arbeitsweise, die konstruktive Gestaltung, der Einsatz und die Wirtschaftlichkeit der Fördermittel werden entscheidend von den Eigenschaften der Fördergüter, der Technologie und dem erforderlichen Durchsatz bestimmt.

10.1. Spezielle Maschinenelemente

10.1.1. Drahtseile

Drahtseile bestehen aus einzelnen hochfesten Drähten, deren Zugfestigkeit 1400 bis 2400 N/mm^2 beträgt. Sie können je nach dem konstruktiven Aufbau und dem metallischen Querschnitt Kräfte von mehr als 6 MN übertragen. Sie sind nach allen Seiten beweglich. Durch geeignete Führung, wie z. B. beim Bowdenzug, sind auch Druckkräfte übertragbar. Der Querschnitt der Einzeldrähte ist vorwiegend rund. Der Durchmesser beträgt 0,2 bis 7 mm. Mit Verseilmaschinen werden die Drähte zu *Litzen* geschlagen. Beim einmaligen Verseilen relativ starker Drähte entsteht das sehr steife *Spiralseil* (Abb. 10.1.1-1). Werden mehrere Litzen aus dünneren Drähten nochmals verseilt, entsteht das zweifach geschlagene, relativ gut biegsame *Litzenseil*. Dreifach geschlagene Drahtseile werden als *Kabelschlagseile* bezeichnet. Durch die Variation der Drahtdurchmesser ergibt sich eine Vielzahl von Macharten, wie Seale-, Warrington-Machart u. a. Daraus folgen spezielle Eigenschaften und Einsatzgebiete. Spiralseile werden meist als Abspann- oder Tragseile für Brücken oder Seilbahnen verwendet. Litzenseile dienen als bewegte Drahtseile für Krane, Bagger, Aufzüge u. a. Fördermittel. Sie können für Arbeitsgeschwindigkeiten von mehr als 20 m/s eingesetzt werden. Geflochtene und Flachseile werden als Unterseile zum Totlastausgleich bei Schachtförderanlagen benutzt. Zur Führung bewegter Drahtseile dienen *Seilrollen*. Zum Aufwickeln bzw. Speichern von Drahtseilen werden *Seiltrommeln* verwendet. Der Durchmesser der Seilrollen und -trommeln muß in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen 14- bis 30mal größer sein als der Drahtseildurchmesser. Nur dann ist eine optimale Lebensdauer der Drahtseile zu erwarten. Bei großen Seillängen, wie bei Aufzügen, Seilbahnen und Schachtförderanlagen, werden die Drahtseile durch Reibschluß von einer *Treibscheibe* angetrieben (Abb. 10.1.1-2).

10.1.2. Ketten

Die Ketten sind wie die Drahtseile zugkraftübertragende Elemente. Bei geeigneter Führung können auch geringe Druckkräfte übertragen werden. Sie sind beweglicher und weniger verschleiß- und korrosionsempfindlich als Drahtseile, besitzen aber bei gleicher Zugkraft eine größere Eigenmasse. Sie werden hauptsächlich bei Stetigförderern, Baggern und Hebezeugen verwendet. Nach dem konstruktiven Aufbau sind Rundstahl- und Stahlgelenkketten zu unterscheiden.
Rundstahlketten bestehen aus einzelnen Gliedern, die aus Rundstahl gebogen und verschweißt

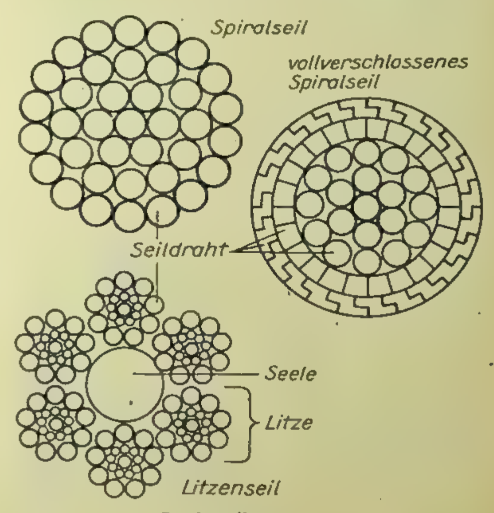


Abb. 10.1.1-1 Drahtseile

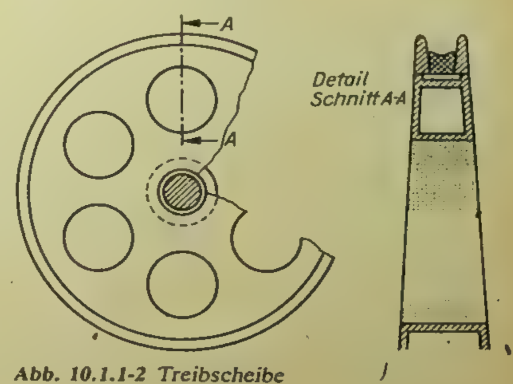
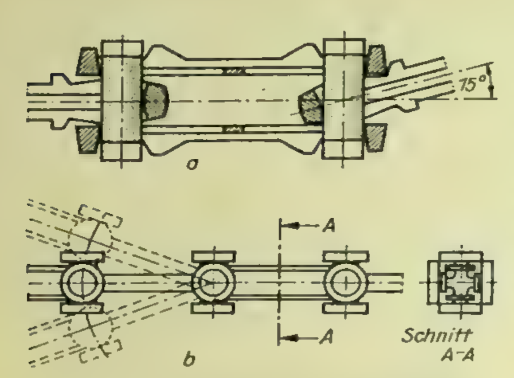


Abb. 10.1.1-2 Treibscheibe



bb. 10.1.2-1 Raumbewegliche Stahlgelenkket-:n: a Steckbolzenkette, b Kreuzgelenkkette

,der geschmiedet werden. Sie sind raumbeweglich, aber nur für Arbeitsgeschwindigkeiten unter 1 m/s geeignet. Sie werden über Kettenräder geführt, die der Kettenform entsprechend gestaltet sind. Das angetriebene *Kettenrad* wird auch *Kettennuß* genannt.

Stahlgelenkketten bestehen aus einzelnen *Kettengliedern*, die auch als *Laschen* oder *Schaken* bezeichnet werden und durch *Bolzen* verbunden sind. In der Regel sind sie nur in einer Ebene beweglich. Sonderkonstruktionen, vorwiegend für Kreisförderer, sind raumbeweglich (Abb. 10.1.2-1). Die in den Fördermitteln verwendeten Ketten haben meist eine große Teilung, die bis zu 1000 mm betragen kann. Die langgliedrigen Stahlgelenkketten werden durch spezielle *Kettenräder*, wegen der Form auch als *Polygon* oder *Turas* bezeichnet, angetrieben. Sie haben 6 bis 8 Polygonecken, damit der Durchmesser nicht zu groß wird. Der Polygoneffekt am Antriebsrad verursacht Längs- und Querschwingungen in der Kette. Deshalb überschreitet die Arbeitsgeschwindigkeit auch nur selten 1 m/s.

10.1.3. Bänder

Bänder haben in der Fördertechnik 2 Aufgaben. Sie sind gleichzeitig zugkraftübertragende und förderguttragende Elemente. Der Einsatz erfolgt vorwiegend bei Stetigförderern und Anschlagmitteln. Nach dem Aufbau unterscheidet man Stahl-, Drahtgeflecht- und Gurtbänder. Veredelte *Stahlbänder* werden in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. *Drahtgeflechtbänder* werden als Kühlbänder verwendet. Die größte Bedeutung haben die *Gurtbänder* und die *Stahlseilgurte*, die beide auch als *Gummifördergurte* bezeichnet werden. Sie bestehen aus zugkraftübertragenden Einlagen aus Textilgewebe oder dünnen Drahtseilen und werden mit Hilfe von Gummideckplatten und Kantenschutzgummi zu einem Band vulkanisiert. Für nur geringe Belastungen werden die Textilgewebe aus Baumwolle oder Kunstfasern mit PVC beschichtet. Gummifördergurte mit Textileinlagen aus Polyamidseide können Zugkräfte bis 31,5 kN/cm Gurtbreite übertragen. Höchsten Ansprüchen genügen heute die Stahlseilgurte für Zugkräfte bis 63 kN/cm Gurtbreite. Bänder werden bis zu Breiten von 3 m produziert. Der Transport erfolgt auf Trommeln aufgewickelt in endlichen Längen von 200 bis 300 m. Auf der Baustelle erfolgt die Endlosverbindung durch Heißvulkanisation oder Kaltkleben (Kaltvulkanisation). Beim Vulkanisieren sind Temperaturen von 130 bis 150 °C und Anpreßdrücke von 0,8 bis 2 MPa erforderlich.

10.1.4. Laufräder und Schienen

Viele Fördermittel oder bestimmte Baugruppen müssen beweglich abgestützt werden. Dazu werden *Laufräder* und *Schienen* verwendet. Der Durchmesser eines Laufrads ist hauptsächlich von der Belastung, aber auch vom Werkstoff, der Fahrgeschwindigkeit und weiteren Einflußgrößen abhängig. Er liegt im Bereich von 40 bis 1250 mm. Kleinere Laufräder werden auch als

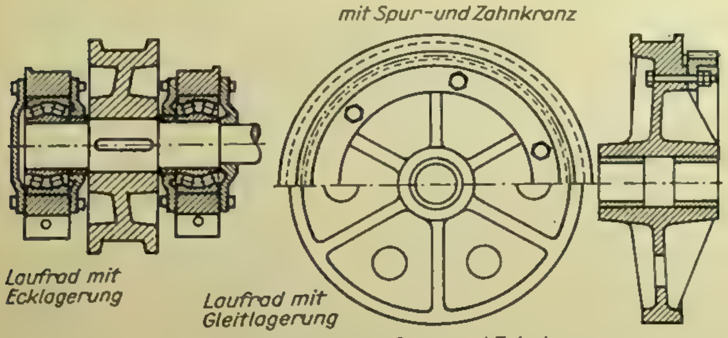


***Abb. 10.1.4-1** Laufradausführungen mit Eck- und Gleitlager*

Rollen bezeichnet. Große Laufräder (Abb. 10.1.4-1) können Belastungen bis 1 MN übertragen. Zur Geradführung erhalten sie einen *Spurkranz*, die Rollen einen Bund, der ein- oder beidseitig angeordnet werden kann. Sie stützen sich über Gleit- oder Wälzlager auf Achsen ab oder werden mit der Welle verbunden, die dann ihrerseits entsprechend gelagert wird. Bei hochbeanspruchten Laufrädern wird die Laufkranzoberfläche gehärtet. Anstelle der Spurkränze werden auch horizontale Laufrollen zur Aufnahme horizontaler Belastungen verwendet. Die Laufräder für Seilbahnen sind in der Laufkranzgestaltung dem runden Drahtseilquerschnitt angepaßt und den Seilrollen sehr ähnlich. Die Schienen übertragen die Belastungen der Laufräder auf den Unterbau (vgl. 16.1.1.) oder die Stahlkonstruktion (Abb. 10.1.4-2). Die Schienen müssen gut ausgerichtet und parallel verlegt werden. Die Befestigung ist so auszuführen, daß alle vertikalen und horizontalen Belastungen aufgenommen werden.

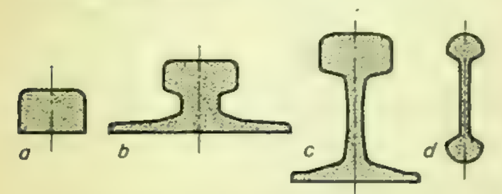


Abb. 10.1.4-2 *Schienenprofile: **a** Flach-, **b** Kran-, **c** Eisenbahn- und **d** Doppelkopfschiene*

10.1.5. Bremsen

Bremsen sind in fast allen Antrieben von Fördermitteln aus Sicherheitsgründen notwendig. Die Hauptaufgabe der hier behandelten mechanischen Bremsen ist das Halten bewegter Teile. Nach dieser Funktion werden sie als *Haltebremsen* bezeichnet. Gleichzeitig müssen sie bewegte Teile so verzögern, daß diese in einer bestimmten Zeit zum Stillstand kommen (*Verzögerungsbremsen*). Wird eine Last mit konstanter Geschwindigkeit abgesenkt, wirken sie als *Senkbremse*. Die Senkbremsung übernehmen heute meist die Motoren. Die elektrische Bremsung erfolgt durch Richtungsumkehr des Motordrehmoments, indem die Motoren als Generatoren gegen Widerstände arbeiten oder in das Netz zurückspeisen. Bei der Gegenstrombremsung wird der Motor gegenläufig angeschlossen.
Das gemeinsame Wirkprinzip aller mechanischen Bremsen ist die Erzeugung von Reibungskräften am Umfang einer umlaufenden Scheibe. Das kann durch Anpressen von Backen oder Bändern erfolgen. Werden die Backen radial von innen oder außen an die *Bremsscheibe* gedrückt, bezeichnet man sie als *Backenbremsen*, bei axialer Anpressung als *Scheibenbremse* (vgl. Abb. 9.1.6-1). Damit an der Welle der Bremsscheibe keine Biegung entsteht, werden praktisch nur symmetrische *Doppelbackenbremsen* ausgeführt. Bei den *Bandbremsen* wird die Bremsscheibe von einem Bremsband umschlungen. Die Biegung der Welle kann dabei nicht vermieden werden. Die Bremsbacken und -bänder werden mit einem Reibbelag mit hohem Reibwert belegt. Die Reibwerte der Bremsbeläge sind von der Temperatur u. a. Einflußgrößen abhängig und können im Betrieb in weiten Grenzen schwanken. Haltebremsen werden mit zwei- bis dreifacher Sicherheit ausgelegt. Die beim Bremsvorgang entstehende Wärme muß aufgenommen und abgeführt werden können. Die Anpreßkräfte der Bremsbacken werden von Massen oder Federn erzeugt, die über Hebelsysteme (Abb. 10.1.5-1) übertragen werden. Zur Lüftung werden heute meist elektro-hydraulische *Bremslüfter* mit eingebauten Federn verwendet.

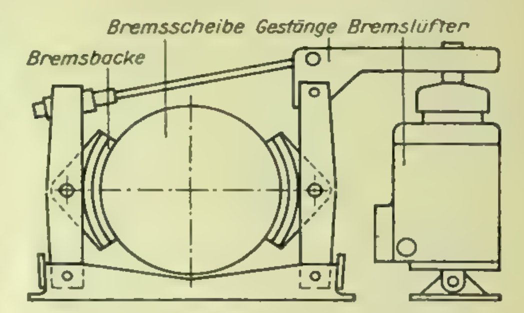


Abb. 10.1.5-1 *Standard-Doppelbackenbremse*

10.2. Spezielle Baugruppen

10.2.1. Antriebe

Die Arbeitsbewegungen der Fördermittel zur Erfüllung der TUL-Prozesse werden von den Antrieben verwirklicht. Jeder Antrieb besteht in der Regel aus dem *Antriebsmotor*, einer *Kupplung*, meist mit *Bremse*, einem *Getriebe* und dem *Arbeitsorgan*. Die Vielfalt der Arbeitsorgane und deren Einsatzbedingungen erfordern immer konkrete Berechnungen und konstruktive Lösungen, um den Erfordernissen hinsichtlich der Materialökonomie und der Energieeinsparung Rechnung zu tragen. Dennoch können einige Grundsätze herausgearbeitet werden. Hinsichtlich der *Betriebsart* arbeiten alle Stetigförderer im *Dauerbetrieb*, wobei die Belastung annähernd gleich groß ist, so daß die Momente im Betrieb nur unwesentlich schwanken. Der Antriebsmotor muß so ausgelegt werden, daß er ohne Unterbrechung mehrere Stunden arbeiten kann.

Beim Anlauf tritt kurzzeitig eine größere Belastung auf. Diese kann von den Motoren erbracht werden, wenn das 1,5fache Nennmoment nicht überschritten wird. Alle Unstetigförderer arbeiten im *Aussetzbetrieb*. Charakteristisch dafür ist, daß die Belastungen sich ständig ändern und beim Beschleunigen und Verzögern sehr groß werden können. Es werden die *Betriebsphasen* Anfahren, Beharren, Bremsen und Pause unterschieden. Sie bilden zusammen ein *Arbeitsspiel*. Für die Auswahl des Antriebsmotors sind die *relative Last*, die *relative Einschaltzeit* und die *Belastungsmomente* in den einzelnen Betriebsphasen von Bedeutung. Die Motoren für den Aussetzbetrieb sind für 20, 40 oder 60% *Einschaltdauer* genormt. Sie können das Nennmoment nur 10 min abgeben, dann ist zur Abkühlung eine Pause erforderlich. Sie können kurzzeitig hohe Belastungen bis zum 3,5fachen Nennmoment abgeben.

10.2.2. Hub- und Windwerke

Die Hub- und Windwerke werden vorwiegend zum vertikalen, aber auch horizontalen oder geneigten Bewegen von Lasten eingesetzt. Der Antrieb bewegt als Arbeitsorgan eine Trommel, auf die ein Drahtseil auf- oder abgewickelt wird. Am Ende des Drahtseils ist das Lastaufnahmemittel (vgl. 10.5.) angeordnet. Große Lasten werden von mehreren Seilsträngen eines Flaschenzugs gehalten. Dadurch können Drahtseile kleineren Durchmessers und kleinere Getriebe verwendet werden. Die Bewegung der Drahtseile wird durch Endschalter begrenzt. 2 Seilwindungen müssen aus Sicherheitsgründen immer auf der Trommel verbleiben. Hubwerke werden bei Kranen zum Heben der Last oder des Auslegers, bei Baggern, Greifern, Elektrozügen u. a. angewendet. Die mit Drahtseilen ausgerüsteten Mechanismen werden *Seilwinden* genannt. Entsprechend gibt es *Kettenwinden*, die als zugkraftübertragende Elemente Ketten verwenden. Für kurze Hubwege werden Hubwerke mit Spindel, Zahnstange, Triebstock oder Hydraulikzylinder ausgeführt.

10.2.3. Drehwerke

Die Drehwerke dienen zur Abstützung bewegter Teile um eine meist vertikale Achse. Für die Bemessung ist wegen der großen zu beschleunigenden Massen das Anfahrmoment maßgebend. Beim Drehwerk ist der Antrieb meist fest am Oberteil angeordnet. Ein Ritzel greift in einen Zahnkranz oder Triebstock ein, der fest mit dem Unterteil verbunden ist. Das Oberteil stützt sich auf Rollen, Laufräder oder Kugeldrehverbindungen (Abb. 10.2.3-1) ab. Der Durchmesser kann bei Tagebaugeräten bis zu 17 m betragen. Sie können Kräfte und Momente aufnehmen. Drehwerke werden bei Kranen, Baggern, Ladern und ähnlichen Fördermitteln angewendet.

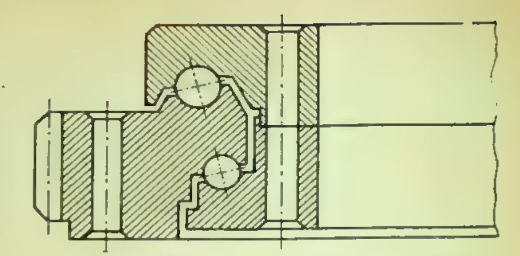


Abb. 10.2.3-1 Kugeldrehverbindung (Schnitt)

10.2.4. Fahrwerke

Die Fahrwerke dienen zur fahrbaren Abstützung der Fördermittel. Die Antriebe arbeiten in der Regel im Aussetzbetrieb. Für die Bemessung ist wie bei den Drehwerken das Anfahrmoment maßgebend, das sich aus Nutz- und Eigenlast ergibt, letztere beträgt ein Mehrfaches der Nutzlast.
Bei den *Schienenfahrwerken* bildet die Paarung Laufrad–Schiene die bewegliche Abstützung. Je nach dem Fördermittel und dessen Funktion und Konstruktion erfolgt die Abstützung statisch bestimmt auf 3 Rädern oder statisch unbestimmt auf 4 Rädern. Die statisch unbestimmte Abstützung erfordert exakt verlegte Schienen. Sind die Stützkräfte so groß, daß ein Rad nicht ausreicht, werden 2 Räder zu einer *Schwinge* zusammengefaßt. Es sind dann ein oder beide Räder angetrieben. Die größten Schienenfahrwerke, die statisch bestimmt bis zum letzten Rad abgestützt sind, bilden die *Einheits-Schienenfahrwerke* für Tagebaugeräte.
Bei den *Raupenfahrwerken* werden die Stützkräfte über einzelne Räder, die auch in Schwingen zusammengefaßt werden können, auf spezielle Kettenglieder, die *Raupenketten*, übertragen (Tafel 38). Die Kettenglieder werden mit den Raupenplatten verbunden, die sich dann auf dem Untergrund abstützen. Je nach der Beschaffenheit des Untergrunds darf der spezifische Druck 60 bis 350 kPa betragen. Raupenplatten von Tagebaugroßgeräten sind deshalb bis zu 3 m breit. Die Fahrwerksantriebe bewegen die Antriebspolygone für die Raupenketten. Raupenfahrwerke sind geländegängig und an keine Fahrbahn gebunden. Sie sind wendiger als Schienenfahrwerke, benötigen aber eine höhere Antriebsleistung und werden bei Baggern und Raupenkranen angewendet.
Schreitwerke übertragen die Stützkräfte über runde oder rechteckige große Platten auf den Untergrund. Sie werden beim Schreiten an-

gehoben, und das Gerät steht dann auf den *Schreitschuhen*. Der Schreitvorgang wird durch Exzenter, Schubkurbeln, Viergelenkgetriebe oder Hydraulikzylinder verwirklicht. Die Schreitgeschwindigkeiten sind gering. Für häufigen Standortwechsel sind sie ungeeignet; sie werden deshalb nur bei bestimmten Einsatzbedingungen der Bagger angewendet.

10.3. Stetigförderer

Die Stetigförderer (engl. *conveyer*) sind eine Gruppe von Fördermitteln zum stetigen, kontinuierlichen Transport von Fördergut, vorwiegend Schüttgut, aber auch Stückgut von einer Quelle zur Senke bzw. von der Aufgabe- zur Abgabestelle. Voraussetzung für einen ununterbrochenen Fordergutstrom ist die kontinuierliche Fördergutzuführung durch Beschickung oder selbständige Aufnahme. Die Vielfalt der Konstruktionen resultiert aus der Funktion im TUL-Prozeß, dem Fördergut und den Eigenschaften der Fördermittel. Nicht jedes Fördergut kann mit jedem Fördermittel transportiert werden. Die größte Bedeutung hat der Gurtbandförderer sowohl hinsichtlich der Erzielung großer Durchsätze bis zu 40 kt/h wie auch eines geringen Energiebedarfs erreicht.

10.3.1. Mechanische Stetigförderer

Bandförderer bestehen aus einem endlosen Band (vgl. 10.1.3.), das sich auf Stütz- und Führungselemente, wie *Luftkissen*, *Gleitebenen*, *Tragrollen* oder *Tragrollenstationen*, abstützt, von einer oder mehreren *Antriebstrommeln* angetrieben, von *Spanntrommeln* gespannt und von *Um-* oder *Ablenktrommeln* um- oder abgelenkt wird. Der Antrieb ist nur funktionsfähig, wenn eine Vorspannkraft F_2 vorhanden ist. Die maximale Zugkraft, die übertragen werden kann, ist $F_1/F_2 = e^{\mu\alpha}$, wobei α der Umschlingungswinkel an der Antriebstrommel und μ der Reibwert zwischen Band und Trommel sind. Die Umfangskraft an der Antriebstrommel ist $F_U = F_1 - F_2$.

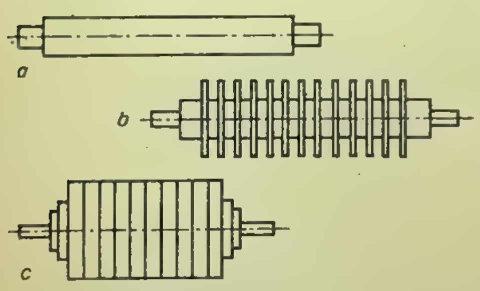


***Abb. 10.3.1-1** Tragrollen: a glatt, b mit Scheiben, c mit Polsterringen*

Die erforderliche maximale Zugkraft ergibt sich aus den Bewegungswiderständen für das Fördergut und das Band. Der Durchsatz folgt aus $Q_V = A \cdot v$, wobei A der Fördergutquerschnitt und v die Fördergeschwindigkeit sind. Gemuldete oder trogförmige Förderquerschnitte erreichen bei gleicher Fördergeschwindigkeit einen höheren Durchsatz als flache.

Gurtbandförderer haben einen Gummifördergurt (vgl. 10.1.3.) als Band. Die Gummifördergurte stützen sich auf einzelnen Tragrollen ab (Abb. 10.3.1-1). Der Tragrollenmantel ist glatt. Mit Hartgummischeiben überzogen werden die Tragrollen im unbeladenen Trum eingesetzt, um die Laufseite zu reinigen. Sind die Tragrollen mit

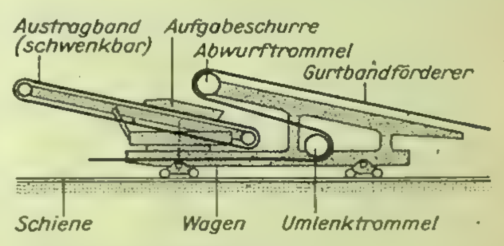


***Abb. 10.3.1-2** Bandabwurfwagen*

Polsterringen ausgerüstet, werden sie im Bereich der Aufgabeschurre verwendet. Die Tragrollenstationen bestehen aus 2 bis 5 einzelnen Tragrollen, die auf Stützböcken und Trägern oder untereinander gelenkig verbunden werden. Letztere werden auch als Girlanden bezeichnet. Sie sind für hohe Arbeitsgeschwindigkeiten über 5 m/s geeignet. In der Regel sind die Tragrollenstationen mit dem Gerüst fest verbunden. Sind sie an längsgespannten Drahtseilen befestigt, so werden diese als *seilverspannte Gurtbandförderer* bezeichnet. Die Aufgabe des Förderguts erfolgt in die kastenförmige Aufgabeschurre, um seitliches Herabfallen zu vermeiden. Bei sehr staubbildenden Fördergütern, wie trockene Kohle u. a., wird die Übergabestelle als geschlossene Schurre ausgebildet. Das Fördergut wird an der *Antriebsstation* über die *Abwurfschurre* abgegeben. Zur beliebigen Abgabe des Förderguts auf der Strecke werden *Abstreicher* eingesetzt, bei denen der Gurt aber nicht gemuldet sein darf. Sonst sind *Bandabwurfwagen* (Abb. 10.3.1-2) notwendig, auch als *Bandschleifenwagen* bezeichnet, weil der Gurt in einer Schleife verlegt wird. Er verfährt auf der Gerüstkonstruktion oder den Rückschienen. Gurtbandförderer werden in allen Bereichen der Volkswirtschaft verwendet. Die größten Anlagen gibt es in den Tagebauen (Tafel 2) mit bis 3 m Gurtbreite und bis 11 km Achsabstand. Gegenwärtig sind Durchsätze von $\approx 3 \cdot 10^4$ m^3/h und Fördergeschwindigkeiten bis 10 m/s erreichbar. Der

mögliche Steigungswinkel liegt je nach dem Fördergut zwischen 15 und 25°. Sonderkonstruktionen sind der *kurvengängige Gurtbandförderer* mit Kurvenradien von mindestens 800 m. Beim *Luftkissenband* wird der Gurt auf einem Luftpolster abgestützt. Dabei beträgt der Druck zwischen Gurt und Blechmulde ≈ 10 kPa. Die Mulde muß gut ausgerichtet sein und eignet sich nicht für extreme Einsatzbedingungen und hohe Belastungen.

Steilförderer setzen spezielle Gurte mit Rippen oder anvulkanisierten Höckern voraus, die ein Abrutschen des Förderguts verhindern.

Stahlbandförderer haben als Zug- und Tragelement ein Stahlband und werden zum Transport von klebenden und heißen Fördergütern verwendet. Für den Einsatz in der Lebensmittelindustrie wird die Stahlbandoberfläche veredelt, oder das ganze Band besteht aus rostfreiem Stahl, das meist auf Gleitbahnen abgestützt wird. Die Fördergeschwindigkeiten liegen unter 1 m/s.

Drahtbandförderer verwenden als Bänder Metallgewebe, Drahtgeflechte oder Drahtglieder entsprechend der Belastung und dem Fördergut. Ihr Einsatz erfolgt meist für heiße oder glühende Fördergüter. Oft wird mit dem Transport Kühlen, Trocknen, Entwässern u. a. verbunden.

Gliederbandförderer bestehen aus ein- oder zweisträngigen Ketten (vgl. 10.1.2.) als Zugmittel und den mit den Kettengliedern fest verbundenen Tragelementen für das Fördergut. Als Tragelemente werden Stäbe, Platten, Tröge, Kästen, Becher oder Mulden verwendet. Sie bilden in gleicher Teilung und gleichem Abstand voneinander angeordnet ein endloses Gliederband. Die Glieder stoßen direkt aneinander, sind gelenkig miteinander verbunden oder überlappen sich gegenseitig, damit feinkörniges Fördergut an den Stoßstellen nicht hindurchfallen kann. Der konstruktiven Gestaltung der Glieder entsprechend werden *Stabband-*, *Plattenband-*, *Trogband-* (Abb. 10.3.1-3), *Kastenband-*, *Becherbandförderer* und *Wandertische* unterschieden. An den Kettengliedern oder den Tragelementen sind Laufrollen befestigt, die die Abstützung der Gliederbänder übernehmen. Sie laufen auf oder in Walz- oder Abkantprofilen der Gerüstkonstruktion. Werden einsträngige raumbewegliche

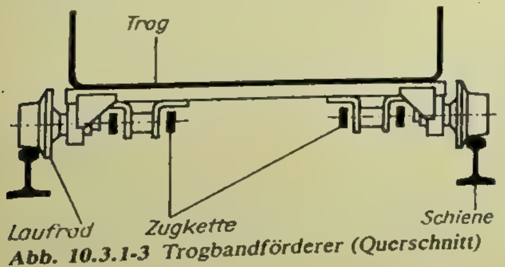


Abb. 10.3.1-3 *Trogbandförderer (Querschnitt)*

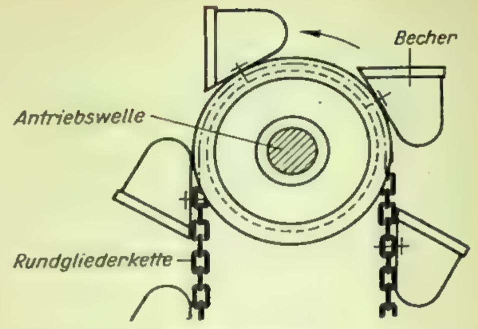


Abb. 10.3.1-4 *Becherwerkskopf*

Ketten, wie Rundstahlketten, als Zugmittel verwendet, können sie *kurvengängig* gestaltet werden. Becher- und Kastenbandförderer ermöglichen den Transport bis zu 60° Steigung.

Gliederbandförderer arbeiten wie Gurtbandförderer in der Regel in der vertikalen Ebene umlaufend. Eine Sonderkonstruktion ist der in der horizontalen Ebene mit Platten als Tragmittel ausgerüstete *Wandertisch*. Er wird in der Fließfertigung als Montageband eingesetzt. Den Erfordernissen der Produktion entsprechend kann er stetig oder entsprechend der Taktfolge umlaufen. Gliederbandförderer werden für harte, grobkörnige, scharfkantige, heiße, glühende, nasse und ätzende Fördergüter eingesetzt, für die der Gurtbandförderer ungeeignet ist. Sie haben bei gleichen Einsatzbedingungen eine größere Eigenmasse und damit einen höheren Energieverbrauch als Gurtbandförderer. Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt bei max. 1 m/s. Der Durchsatz von 1 kt/h bei 1,6 m Breite wird nur in Sonderfällen bei Breiten bis zu 3 m überboten.

Becherwerke (*Elevatoren*) bestehen aus endlosen zweisträngigen Ketten oder Gurten als Zugmittel, an denen Becher als Tragmittel befestigt sind. Beim *Senkrechtbecherwerk* sind die Becher fest mit dem Zugmittel verbunden. Sie dienen zum vertikalen Transport von Schüttgut. Die *Pendelbecherwerke* haben gelenkig befestigte Becher, deren Schwerpunkt so liegt, daß sie bei senkrechtem, geneigtem oder auch horizontalem Transport immer eine waagerechte Lage einnehmen. Der Antrieb wird immer oben angeordnet. Das ganze Becherwerk oder der auf- und ablaufende Strang getrennt, können völlig staubdicht gekapselt werden. Die Füllung der Becher erfolgt unten durch Schöpfen des Förderguts oder durch Füllmechanismen. Die Entleerung der Senkrechtbecherwerke geschieht selbständig beim Umlauf um das Antriebskettenrad (Abb. 10.3.1-4). Gelenkig befestigte Becher werden an der Entleerstelle entsprechend geführt und gekippt. Die Form der Becher ist nach den Eigenschaften des Förderguts auszuwählen. Becherwerke werden zum Transport von Getreide, Mehl, Granulat, Sand und Schotter eingesetzt. Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt mit Ketten als

Zugmittel bei 1,5 m/s. Sie erreichen Durchsätze bis zu 1 kt/h. Hochleistungsbecherwerke erreichen höhere Durchsätze. Die Förderhöhe liegt bei max. 100 m, mit Stahlseilgurtbecherwerken sind bis 150 m erreichbar.

Taschenförderer, auch *Gurttaschenförderer* genannt, bestehen aus zweisträngigen Gurten, Ketten oder Drahtseilen als Zugmittel, die durch Querstreben verbunden sind. Als Tragmittel dienen in Taschenform gelegte Gurte oder Taschen aus anderem Material, in die das Schütt- oder Stückgut aufgegeben wird.

Gehängeförderer verwenden als Zugmittel Ketten oder Drahtseile, an denen die Tragmittel für das Schütt- oder Stückgut angehängt werden. Die Tragmittel oder Gehänge können in Form und Abmessungen dem Fördergut angepaßt werden (Abb. 10.3.1-5).

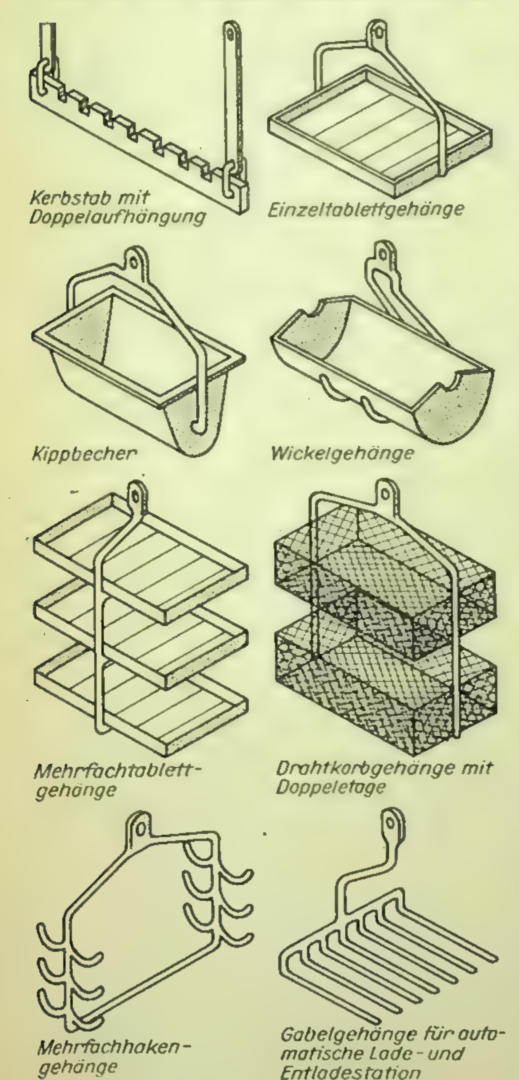


***Abb. 10.3.1-5** Tragmittel für Gehängeförderer*

Beim *Schaukelförderer* sind die Gehänge gelenkig mit der ein- oder zweisträngigen Kette verbunden. Es ist geneigte und senkrechte Förderung möglich, da die Gehänge immer eine Normallage einnehmen. Bei entsprechend konstruktiv ausgebildetem Gehängeboden, z. B. rechenartig, kann die Last selbständig aufgenommen und abgegeben werden, wodurch TUL-Prozesse mechanisiert werden können. Die Fördergeschwindigkeit erreicht bis zu 0,5 m/s.

Der *Kreisförderer* ist der am weitesten verbreitete Gehängeförderer zum Transport von Stückgut. Als Zugmittel dienen raumbewegliche Spezialketten (vgl. Abb. 10.1.2-1), seltener spezielle Drahtseile. Die Gehänge werden je nach der Belastung an zwei- oder vierrädrige Fahrwerke gehängt. Sie laufen auf oder in Führungsbahnen aus Walzprofilen, abgekanteten Profilen oder geschlitzten Rohren. Die Führungsbahnen können in beliebiger Linienführung als geschlossener Kreislauf an der Deckenkonstruktion von Gebäuden, an Wandkonsolen oder Stützen befestigt werden. *Eisenbahnkreisförderer* haben eine gemeinsame Führungsbahn für die Kette und die Gehänge, die fest miteinander verbunden sind. Der *Zweibahnkreisförderer* hat für die Kette und die Gehänge mit Fahrwerken getrennte Führungsbahnen. Die Gehänge für Belastungen bis zu 5 kN werden von an der Kette befestigten Mitnehmern bewegt. Durch senkrechtes oder horizontales Auslenken der Lastführungsbahn kann das Gehänge vom Zugmittel getrennt werden (Power-und-Free-System) und von Hand oder mit Hilfe anderer Antriebssysteme getrennt bewegt werden.

Umlaufförderer laufen ständig um und transportieren dabei die Lasten. Die Gehänge sind pendelfrei zwischen zweisträngigen, parallel oder versetzt angeordneten Ketten oder Drahtseilen befestigt. Der Förderweg kann waagerecht, geneigt oder senkrecht sein. Sie werden in Lagern eingesetzt. Zum Personentransport dient der Umlaufaufzug oder *Paternoster* in öffentlichen Gebäuden und Bürohäusern.

Tragkettenförderer sind Stückgutförderer, bestehend aus einer ein- oder zweisträngigen Kette mit Mitnehmern für das Fördergut, das tragend bewegt wird. Die Förderung kann waagerecht, geneigt oder senkrecht erfolgen.

Stegkettenförderer bestehen aus ein- oder mehrsträngigen endlosen Ketten, die mit Mitnehmern verbunden sind. Sie laufen in einer offenen Rinne und schieben das Schüttgut auf einer Gleitfläche vor sich her. Bei Verwendung von Rundgliederketten haben sie eine sehr geringe Bauhöhe. Der *Panzerförderer* (Abb. 10.3.1-6) wird im untertägigen Bergbau vor Ort in flachen Flözen eingesetzt. Die abgebaute

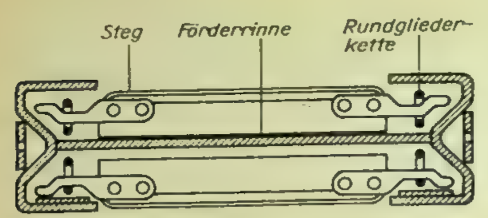


Abb. 10.3.1-6 Panzerförderer (Querschnitt)

Kohle fällt direkt auf den Förderer. Bei einfallenden Strecken werden *Bremsförderer*, meist als *Stauscheibenförderer* ausgeführt, eingesetzt. Anstelle der Stege werden hier an einer einsträngigen Kette Scheiben befestigt. Die konstante Fördergeschwindigkeit verhindert, daß das Fördergut auf der Neigung selbständig abrollt.

Trogkettenförderer, auch *Redler* genannt, bestehen aus Stahlgelenkketten mit Mitnehmern, die das Schüttgut in einem geschlossenen Trog mit rechteckigem Querschnitt gleitend auf dem Trogboden bewegen. Die Tröge können völlig luftdicht abgeschlossen werden. Explosionsgefährdete Schüttgüter, wie Kohlenstaub, können so unter Schutzgas transportiert werden. Es ist waagerechte, geneigte und senkrechte Förderung möglich, wobei für die senkrechte Förderung spezielle Mitnehmer erforderlich sind und das Fördergut im senkrechten Strang nicht abreißen darf. Es muß von unten bzw. waagerecht gestützt werden und eine geschlossene Säule bilden. Die Anwendung erfolgt in Brikettfabriken, Kraftwerken, Getreidesilos, der chemischen Industrie usw. Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt bei 0,4 m/s, bei geeigneten Fördergütern können 0,6 bis 0,8 m/s erreicht werden. Die Förderlänge beträgt bei horizontaler Förderung bis zu 135 m, bei vertikaler Förderung bis zu 30 m. Der Durchsatz erreicht bei vertikaler Förderung bis 250 m^3/h und bei horizontaler bis 450 m^3/h.

Schleppförderer haben als Zugmittel Ketten, Drahtseile, Gurte oder Stangen, die mit festen Mitnehmern ausgerüstet sind. Sie nehmen das Stückgut mit, das auf Gleit- und Rollenbahnen oder auf Rollwagen liegt. Vorwiegend werden sie zum mechanisierten, horizontalen Transport in der Fließproduktion angewendet. Beim *Schleppkettenförderer* stützen sich die Ketten auf Laufrollen in den Führungsbahnen ab. Werden die Rollwagen auf der Fußbodenebene bewegt und sind die Ketten unter dieser Ebene angeordnet, so daß nur die Mitnehmer zu sehen sind, werden sie als *Unterflur-Schleppkettenförderer* bezeichnet. Die Lasten können mehrere Kilonewton betragen. Die Fördergeschwindigkeit liegt bei 0,6 m/s.

Schubstangenförderer sind Schüttgutförderer mit einer sich hin- und herbewegenden Schubstange, an der feste oder gelenkige Mitnehmer angeschlossen sind, die das Fördergut in einem offenen oder geschlossenen Trog bewegen. Sie werden in der mechanischen Fertigung zum Spänetransport verwendet.

Schneckenförderer. Das Arbeitsorgan der Schneckenförderer ist die *Schnecke*. Sie besteht aus einer Welle mit einem schraubenförmig angeschweißten Blech und bewegt in einem offenen oder geschlossenen, feststehenden Trog oder Rohr das Fördergut.

Vollschnecken (Abb. 10.3.1-7) können alle leichtfließenden, wenig schleißenden Fördergüter, wie Getreide, Zement u. a., fördern. Sie werden auch zur Bunker- und Siloentleerung verwendet.

Bandschnecken sind geeignet für zähe und grobstückige, nichtstopfende Güter. Das Schneckenband wird durch Stege mit der Welle verbunden. Das Förderprinzip führt immer zu einer gleichzeitigen Umwälzung des Gutes beim Fördervorgang. Eine intensive Mischung wird durch die Flügel, auch *Segmentschnecken* genannt, beim Fördervorgang erzielt. Die Fördergutaufgabe und -abgabe kann durch Öffnungen im Trog an jeder gewünschten Stelle erfolgen. Der spezifische Energieverbrauch liegt erheblich über dem anderer Stetigförderer. Der Durchsatz überschreitet 100 t/h nur in Ausnahmefällen. Mit mehreren Zwischenlagern für die Welle können Förderlängen von 40 m erreicht werden. Bei entsprechenden Drehzahlen einer vertikal stehenden Schneckenwelle, die das Fördergut dann durch die Fliehkräfte an die Rohrwand drückt, ist auch die Senkrechtförderung möglich.

Beim *Schneckenrohrförderer* dreht sich das ganze Rohr. Die Schneckenbänder sind innen am Rohrumfang angeschweißt. Der Einsatz erfolgt bei der Zementproduktion als Drehrohrofen (vgl. 6.1.4., Tafel 20). Das Gut kann nur an einer Seite aufgegeben und an der anderen wieder abgegeben werden. Sie arbeiten immer bei einer leichten Neigung.

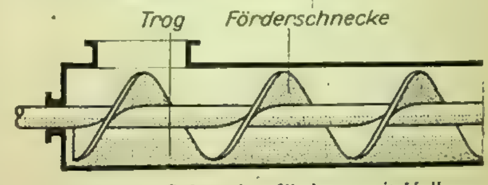


Abb. 10.3.1-7 Schneckenförderer mit Vollschnecke

Schwingförderer bestehen aus einer Rinne, einem Trog oder Rohr, das durch den Antrieb zu ebenen oder räumlichen Schwingungen angeregt wird. Die Massenkräfte werden auch auf das Fördergut übertragen. Je nach der Amplitude und der Frequenz der Bewegung wird zwischen dem Gleit- oder Beschleunigungsverfahren (Schüttelrutsche) und dem Wurfverfahren unterschieden. Die *Schüttelrutsche* wird von einem Kurbeltrieb

angetrieben. Die Rinne (Rutsche) stützt sich auf Laufrollen ab. Die Amplitude liegt bei 50 bis 300 mm, die Frequenz bei 0,7 bis 1,7 Hz. Beim Hingang ist die Bewegung von Rinne und Gut gleich. Am Ende ist die Verzögerung der Rinne so groß, daß sich der Reibschluß aufhebt und das Gut gleitet, während sich die Rinne zurück bewegt. Beim *Schwingförderer* mit Kurbel-, Unwucht- oder elektromagnetischem Antrieb wird bei Amplituden von 0,05 bis 15 mm und Frequenzen von 5 bis 100 Hz das Wurfprinzip verwirklicht. Die Rinnen werden an Schraubenfedern (Freischwinger) aufgehängt oder durch Lenkerfedern zwangsgeführt. Die resultierende Kraft der Antriebe ist so gerichtet, daß sie im spitzen Winkel zur Förderrichtung liegt. So hebt sich das Fördergut beim Rückgang der Rinne ab. Die *Freischwinger* mit elektromagnetischem Antrieb können bis zu 4 m, mit Unwuchtantrieb bis zu 10 m Förderlänge erreichen. *Lenkergeführte Schwingförderer* mit Unwuchtantrieb wurden bis zu 35 m Förderlänge gebaut. Mit Gegenschwingrahmen, bei strenger Verwirklichung des Resonanzprinzips, wodurch die Fundamentbelastungen gegen Null gehen, sind 60 bis 80 m Förderlänge verwirklicht worden. Schwingförderer haben sich als Bunkerabzugseinrichtungen bewährt. Mit 3 m breiten Rinnen können Durchsätze bis zu 2 kt/h erreicht werden. Mit geschlossenen Rinnen wird die Umweltverschmutzung durch staubbildende Fördergüter verhindert. Der Verschleiß gegenüber änderen Stetigförderern ist minimal.

Schwingförderer finden für viele TUL-Prozesse Anwendung. Sie sind auch zum Kühlen, Klassieren und Trocknen in Verbindung mit der Förderung sowie als Zuteil- und Sortiereinrichtungen geeignet. Die *Wendelschwingrinne* ist ein Senkrechtförderer. Der Durchsatz übersteigt selten 20 t/h, wobei Förderhöhen bis 8 m erreicht werden. Sie eignet sich wegen des langen Wegs des Förderguts auf der Wendel als Kühlaggregat für Granulat in der chemischen Industrie oder für den Formsandtransport in Gießereien.

Rollförderer arbeiten vorwiegend ohne Antrieb unter Ausnutzung der Schwerkraft. Sie werden mit einer Neigung von 2 bis 4° eingesetzt. Bei den *Walzenrollenbahnen* werden in einer Gerüstkonstruktion Rollen als Tragmittel für das Stückgut verwendet, die den Tragrollen der Gurtbandförderer entsprechen: Die *Scheibenrollenbahnen* sind für geringere Belastung geeignet. Das Fördergut stützt sich gegen Rollen ab (Abb. 10.3.1-8), deren Durchmesser größer als die Breite ist. Bei *Kugelbahnen* dienen Kugeln zur Belastungsaufnahme. Die Rollen oder Kugeln können in gerade oder kurvenförmige Gerüste eingesetzt werden. Mit Hilfe von Weichen können komplette Fördersysteme zusammengestellt werden. Beim *Rollgang* werden die Rollen einzeln oder in Gruppen angetrieben. Schwere Rollgänge werden in Stahl- und Walzwerken angewendet.

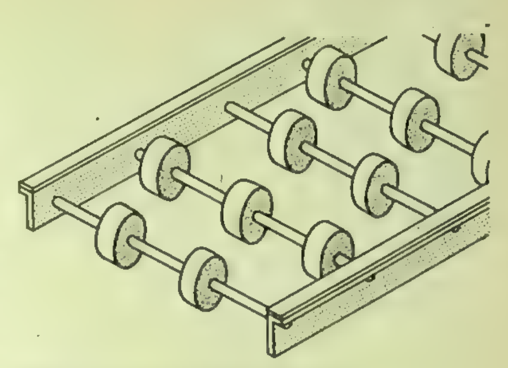


Abb. 10.3.1-8 Scheibenrollenbahn

Drehteller und Schleuderförderer. *Drehteller* bestehen aus einer angetriebenen Scheibe, die sich um eine vertikale Welle dreht. Sie gestatten eine waagerechte oder leicht geneigte Förderung von einer Seite zur anderen und werden als Austragsvorrichtung oder -hilfen angewendet. Das Stück- oder Schüttgut wird durch Abstreicher vom Drehteller geleitet. Die *Schleuderförderer* haben hohe Arbeitsgeschwindigkeiten, damit das Schüttgut weggeschleudert wird, um u. a. bei der Einlagerung in Bunkern oder der Beladung von Waggons und Schiffen auch die äußeren Ecken ausfüllen zu können. Es werden kurze Gurtbandförderer, Trommeln und Drehteller angewendet.

10.3.2. Strömungsförderer

Strömungsförderer verwenden als Trag- und Treibmittel für das Stück- oder Schüttgut ein in offenen Rinnen oder geschlossenen Rohrleitungen bewegtes Medium. Der Energieverbrauch ist größer als bei anderen Stetigförderern, dennoch sind sie zur Lösung bestimmter TUL-Prozesse notwendig.

Pneumatische Förderer benutzen ein Gas, in der Regel Luft, als Trag- und Treibmittel. In geschlossenen Rohrleitungen können alle trockenen, leicht fließenden, kleinstückigen (körnigen) bis staubförmigen Schüttgüter transportiert werden. *Saugluftanlagen* bestehen aus der Saugeinrichtung, den Rohrleitungen, Abscheidern, Filtern und dem Sauggebläse. Sie arbeiten mit Drücken von 40 bis 70 kPa. Das Schüttgut kann an mehreren Stellen selbständig durch *Saugtrichter* oder *-rüssel* aufgenommen, aber nur an einer Stelle abgegeben werden. Die Trennung des Gutes vom Gasstrom erfolgt in den Abscheidern. Durch plötzliche Erweiterung des Rohrquerschnitts wird das Gut nicht mehr getragen, fällt aus dem Gasstrom und sammelt sich im Abscheider. Von dort wird es abgezogen. *Druckluftanlagen* bestehen aus einem Gebläse, einer

Schleuse (Injektor, Zellenrad, Schnecke) zum Aufgeben des Schüttguts, Rohrleitungen und Abscheidern (Zyklon oder Rezipient). Sie arbeiten mit Druckluft bis 1,5 MPa. Das Gut kann nur an einer Stelle aufgegeben, aber an mehreren Abscheidern abgegeben werden. Filter trennen die feinsten Schüttgutteilchen vom Gasstrom.
Die Wirkungsweise von Saug- und Druckluftanlagen ist prinzipiell gleich. Der Durchsatz und die Förderentfernung sind vom Förderzustand abhängig. Es ist zwischen Dicht-, Misch- und Dünnstromförderung zu unterscheiden. Die *Dichtstromförderung* arbeitet mit geringem Gasdurchsatz und geringer Schüttgutgeschwindigkeit und erreicht bei Durchsätzen bis 100 t/h nur Förderlängen bis 100 m. Die *Dünnstromförderung* mit großem Gasdurchsatz und hohen Arbeitsgeschwindigkeiten kann bei 500 m Förderlänge und 50 m Förderhöhe noch Durchsätze bis 50 t/h erreichen. Der spezifische Energieverbrauch liegt aber höher als bei der Dichtstromförderung. Bei geringeren Entfernungen werden höhere Durchsätze erbracht.
Pneumatische Förderer werden zum Be- und Entladen von Schiffen, Waggons, Bunkern u. a. eingesetzt. Es können gefördert werden: Getreide, Mehlprodukte, Zement und Kohle, aber auch Versatzmaterial unter Tage. Sonderkonstruktionen sind die *Rohrpostanlagen*, die das Fördergut in geschlossenen Kapseln durch die Rohrleitungen transportieren, *Förderrinnen* für Schüttgut, bei denen ein Gasstrom von 110 bis 140 kPa durch eine poröse Schicht geblasen wird und das Gut sich auf der Luftschicht bewegt, sowie *Luftkissenförderer* für Stückgut, bei denen das Gut wie auf einem Luftpolster bewegt wird. Bedeutung erlangt weiter die pneumatische Förderung von Großbehältern (Containern) in Rohrleitungen.
Hydraulische Förderer verwenden eine Flüssigkeit, in der Regel Wasser, als Trag- und Treibmittel für Schüttgüter, wie Kohle, Erze, Salze, Abraum, Torf, Asche, Rüben u. a. Gut und Flüssigkeit werden im Verhältnis bis 1:3 gemischt und durch eine oder mehrere in Abständen angeordnete Pumpen bewegt. Auch kann nur die Flüssigkeit durch eine Pumpe bewegt werden, und das Gut wird vom Flüssigkeitsstrom mitgerissen oder durch Vorrichtungen zugeführt. Es gibt Anlagen bis 500 km Förderlänge. Projekte bis zu 1 500 km liegen schon vor. Durchsätze bis zu $\approx 2000\ m^3/h$ Feststoff wurden bisher erzielt. Hydraulische und hydro-pneumatische Förderer gewinnen für den marinen Bergbau zunehmend an Bedeutung (vgl. 1.5.2.).

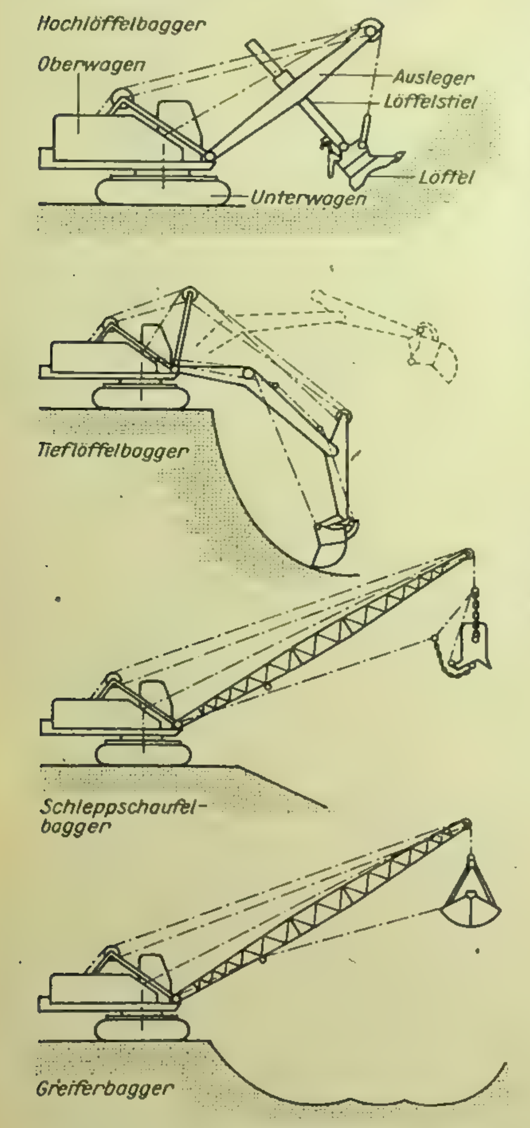


***Abb. 10.4.1-1** Universalbagger mit Hochlöffelausrüstung*

10.3.3. Auf- und Übergabeeinrichtungen

Stetigförderer können nur selten das Fördergut selbständig aufnehmen. An den Aufgabestellen werden *Rutschen* als *Einweg-*, *Mehrweg-* oder *Wendelrutschen*, die gleichzeitig auch als Schwerkraftförderer fungieren, eingesetzt. Damit das Gut an den Seiten nicht herabfallen kann, werden *Kästen* oder *Schurren* angewendet. Als mechanische *Aufgeber* werden insbesondere zur gleichmäßigen Beschickung *Zellenrad-*, *Walzen-*, *Schöpfrad-*, *Teller-*, *Schub-*, *Schubstangen-*, *Schwing-*, *Gurtband-*, *Gliederband-*, *Schnecken-* und *Kettenaufgeber* angewendet.

Tagebaugeräte sind nicht nur Fördermittel zur Lösung von TUL-Prozessen. Sie bewältigen gleichzeitig noch Gewinnungs- oder Verkippungsaufgaben. Tagebaugeräte bilden ein Spezialgebiet der Fördertechnik mit spezifischen Einsatzbedingungen, die bei der Konstruktion besondere Beachtung finden müssen. Sie sind vorwiegend in Tagebauen, aber auch modifiziert in anderen Bereichen der Volkswirtschaft anzutreffen.

10.4.1. Bagger

Bagger sind Maschinen zur Gewinnung und zum Transport von gewachsenem, gesprengtem oder geschüttetem Material, wie Erde, Sand, Abraum, Kohle, Kies, Schotter, Erz u. a. Sie werden eingesetzt im Siedlungs-, Hoch- und Industriebau zum Ausheben von Fundamentgruben, im Straßen- und Eisenbahnbau zur Herstellung von Einschnitten und Dämmen, im Kanal-, Fluß- und Hafenbau zum Herstellen und Freihalten von Fahrrinnen, im Tagebau zum Abtragen von Deckgebirge und zur Gewinnung von Bodenschätzen und Baustoffen. Eine Einteilung ist nach verschiedenen Gesichtspunkten möglich. Nach den Einsatzbedingungen unterscheidet man Naß- und Trockenbagger, nach der Anzahl der Grabgefäße Ein- und Mehrgefäßbagger, nach der Stellung des Arbeitsorgans Hoch-, Tief-, Schwenk- und Flachbagger usw.

Eingefäßbagger sind unstetig arbeitende Geräte, die nur ein Grabgefäß besitzen. Der *Universalbagger* (Tafel 38) besteht aus einem Grundgerät, das für die verschiedenen Einsatzfälle mit speziellen Arbeitsorganen, wie Hoch-, Tieflöffel, Schleppschaufel, Greifer, Kran, Ramme u. a., ausgerüstet werden kann. Das Grundgerät hat einen zentralen Antrieb, meist einen Dieselmotor. Alle Arbeitsbewegungen, wie das Heben und Vorstoßen des Löffels, das Drehen des Baggeroberteils und das Fahren, werden durch Betätigen der zugehörigen Kupplungen eingeleitet. Beim *Hochlöffelbagger* ist am Ausleger verschieb- und hebbar der Löffelstiel mit dem Grabgefäß angeordnet. Beim Anheben mittels Seiltrieb wird der Löffelstiel vorgestoßen, so daß sich der Löffel in das Gut eingraben und füllen kann. Danach wird das Baggeroberteil gedreht und ein anderes Fördermittel durch Öffnen der Bodenklappe des Löffels beladen. Dann beginnt nach der Rückdrehung ein neues Arbeitsspiel. An den *Löffelzähnen* bzw. der *-schneide* können große Kräfte erzeugt werden, so daß auch schwerste Böden und gesprengter Fels gebaggert werden können. Universalbagger haben Löffelinhalte bis zu 8 m^3. Spezielle Großlöffelbagger erreichen bis 150 m^3 Löffelinhalt (Abb. 10.4.1-1).

Beim *Tieflöffelbagger* ist der Löffel gelenkig mit dem Löffelstiel verbunden. Er hat keine Bodenklappe und entleert durch die Füllöffnung.

Schleppschaufelbagger, auch *Schürfkübel-*, *Eimerseilbagger* oder *Dragline* genannt, haben als Charakteristikum die mittels einer Drahtseilwinde bewegte *Schleppschaufel*, die zum Bagger hingezogen oder geschleppt wird, wobei sie sich füllt. Die Entleerung erfolgt durch Ankippen mittels eines Entleerseils. Große Schleppschaufelbagger haben bis 100 m lange Ausleger und max. 160 m^3 Schleppschaufelinhalt.

Autobagger sind mit einer Baggerausrüstung bestückte Lastkraftwagen. *Mobilbagger* haben

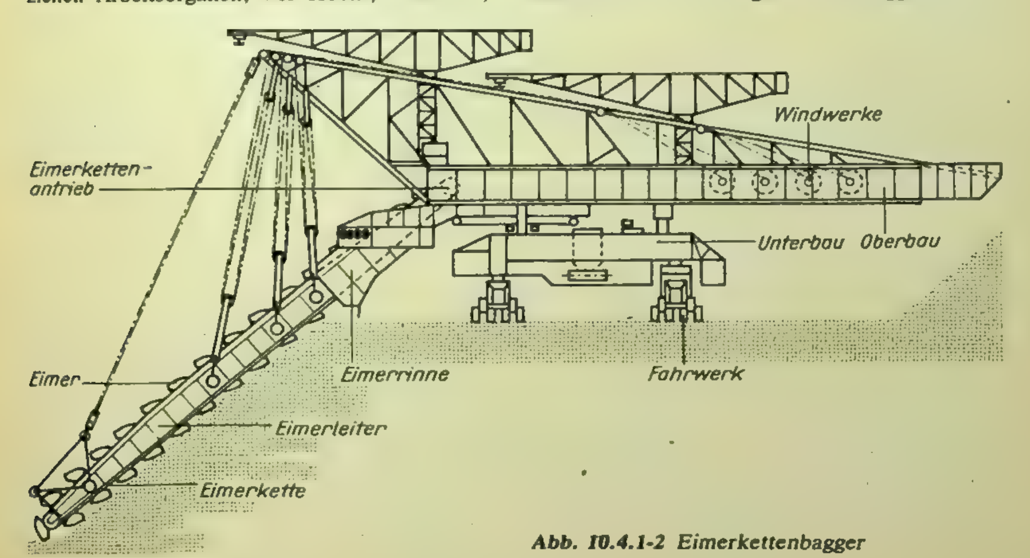


Abb. 10.4.1-2 Eimerkettenbagger

gegenüber dem üblichen Raupenfahrwerk ein Luftreifenfahrwerk.
Hydraulikbagger, deren Grabgefäße bis zu 8 m^3 Inhalt erreichen, verwenden anstelle der Seilwinden Hydraulikzylinder und -motore zur Realisierung der notwendigen Arbeitsbewegungen (Tafel 38). In der Regel haben die Eingefäßbagger zur Fortbewegung ein Raupenfahrwerk (vgl. 10.2.4.). Haben sie einen Schreitmechanismus, werden sie unabhängig von der Arbeitsausrüstung als *Schreitbagger* bezeichnet.
Eimerkettenbagger (Abb. 10.4.1-2) sind stetig arbeitende Mehrgefäßbagger. An einer endlosen Stahlgelenkkette (vgl. 10.1.2.) sind schalenförmige *Eimer* befestigt. Die *Eimerkette* wird in einer festen Bahn innerhalb der *Eimerleiter* und der *Eimerrinne* geführt und läuft auf der Eimerleiter auf gefederten Rollen wieder zurück. Die Kette wird am *Antriebsturas*, einem Polygon mit meist 8 Ecken angetrieben. Am *Umlenkturas* wird die Kette gespannt. Zwischen dem oberen und dem unteren Turas schneiden die Eimer das Baggergut und füllen sich dabei gleichzeitig. Beim Lauf um den Antriebsturas entleeren sie sich über die hintere Kante in den *Schüttrumpf*, einen Trichter. Von dort wird das Gut dann mittels Gurtbandförderer weitertransportiert. Die Eimerleiter ist durch mehrere Gelenke unterteilt. Sie kann durch Hubwinden (Seilwinden, Windwerke) gehoben oder gesenkt werden. Bei abgesenkter Eimerleiter arbeitet der Eimerkettenbagger im *Tiefschnitt*, bei hochgestellter im *Hochschnitt*. Das Oberteil des Baggers mit der Eimerleiter ist auf dem Unterbau mit dem Fahrwerk drehbar. Für Eimerkettenbagger mit Schienenfahrwerken ist der *Strossenverhieb* typisch, wobei der Bagger entlang einer Strosse verfährt.
Kleinere Eimerkettenbagger dienen zur Rohrverlegung für Dränung und Entwässerung oder zum Ziehen von Gräben. Letztere werden als *Grabenbagger* bezeichnet. Das Fassungsvermögen der Eimer kann 0,1 bis 4 m^3 betragen und der effektive Durchsatz 10^4 m^3/h erreichen. Dazu sind 2 × 2 MW Antriebsleistung notwendig. Die Abtraghöhe bzw. -tiefe kann bis zu 31 m, also eine Gesamtabtraghöhe von ≈ 60 m erreichen.
Schaufelradbagger (Abb. 10.4.1-3) sind stetig arbeitende Mehrgefäßbagger. Das Arbeitsorgan ist das Schaufelrad mit 6 bis 22 *Schaufeln*, das an der Spitze des *Schaufelradauslegers* angeordnet wird (Tafel 2). Die Schaufeln haben durchgehende Schneiden bzw. Schneidmesser, die für das Baggern von schweren Bodenarten mit *Reißzähnen* bestückt werden. Der Schaufelradausleger ist mittels der Hubwinden heb- und senkbar. *Vorschublose Schaufelradbagger* haben einen gelenkig am Oberbau befestigten Ausleger. *Schaufelradbagger mit Vorschub* können den Ausleger mit einer *Vorschubkatze* oder teleskopartig aus- und einschieben. Durch das gleichzeitige Drehen des Schaufelrads und des gesamten Oberbaus wird das Baggergut von den Schaufeln gewonnen und aufgenommen. Das Schaufelrad wird als *Zellen-*, *Halbzellenrad* oder zellenlos ausgeführt. Im Bereich der oberen Stellung der Schaufeln entleeren sie sich. Über die *Radschurre* gleitet das Gut auf den Gurtbandförderer im Schaufelradausleger, der es weitertransportiert. Typisch für Schaufelradbagger ist der *Blockverhieb*, wobei der Bagger beim Abbau eines Spanes steht und nur zur Einstellung des nächsten Spanes vorfährt. In der Regel werden Raupenfahrwerke verwendet. Der Schaufelinhalt liegt im Bereich von 0,3 bis 6,3 m^3. Es werden Durchsätze bis zu 15000 m^3/h erreicht, wozu bis zu 3 × 800 kW Antriebsleistung erforderlich sind. Je nach der Länge des Schaufelradauslegers sind Abtraghöhen von 50 m und dazu noch 15 m Abtragtiefe möglich.
Naßbagger. *Naß-* oder *Schwimmbagger* bestehen aus einem Schiffskörper oder Ponton, der mit einer entsprechenden Baggereinrichtung ausgerüstet wird. Der Antrieb der Bagger und deren Arbeitsausrüstungen erfolgt mit Dieselmotor, dieselelektrisch oder mit Turbinen. *Eingefäßnaßbagger* (Tafel 38) arbeiten meist mit Greifern als Arbeitsorgan. Die Löffelbaggerausrüstung ist sehr selten. Sie dienen meist der Sand- und Kiesgewinnung auf Binnenseen. *Eimerkettenschwimmbagger* (Abb. 10.4.1-4) haben eine Eimerkette als Arbeitsorgan. Die Eimer sind nur oben offen. Zum Abfließen des Wassers kann der

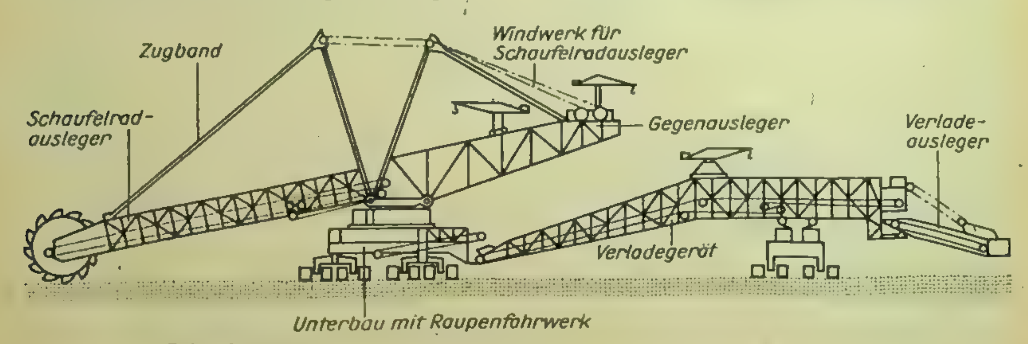


***Abb. 10.4.1-3** Schaufelradbagger*

Mantel perforiert sein. Die Eimer werden nur beim Umlauf um den unteren Turas gefüllt; die Entleerung erfolgt am oberen Turas, dem Antriebsturas, über Kopf. Der Abtransport geschieht durch Rohrleitungen, über Gurtbandförderer oder mit Schuten. *Pumpen-* oder *Saugbagger* bestehen aus dem Saugrohr und einer Förderpumpe, welche Boden-Wasser-Gemische im Verhältnis 1:3 bis 1:6 ansaugen. Der *Schleppkopfsaugbagger* schleppt das Saugrohr über den

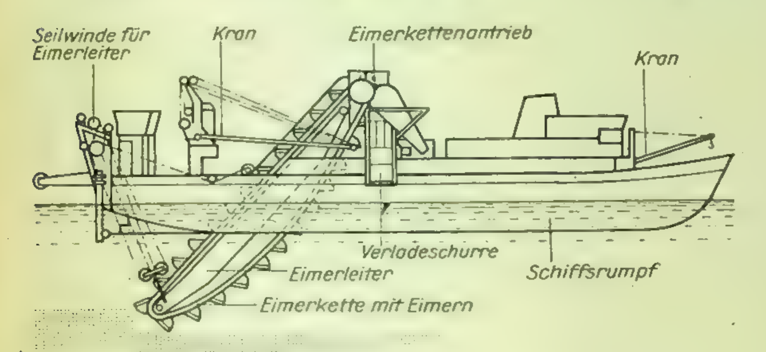


Abb. 10.4.1-4 *Eimerkettenschwimmbagger*

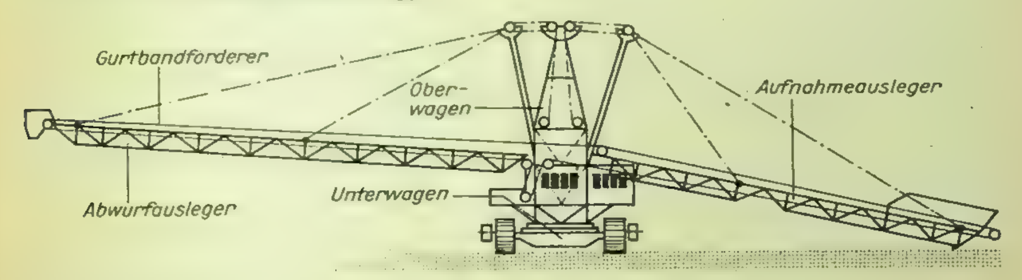


Abb. 10.4.2-1 *Bandwagen*

Grund, der *Schneidkopfsaugbagger* besitzt zusätzlich einen Schneidkopf, der den Boden auflockert. Der Abtransport erfolgt wie bei den Eimerkettenschwimmbaggern. *Laderaumsaug-* oder *Hopperbagger* haben einen als Laderaum ausgebildeten Schiffskörper, der mit dem Baggergut gefüllt wird. Sie sind gleichzeitig Gewinnungsgerät und Fördermittel.

10.4.2. Absetzer

Absetzer sind Fördermittel, die gleichzeitig zum Verkippen, Aufschütten oder Ablagern von Schüttgütern, wie Abraum in Tagebauen (Tafel 2), Sand, Kies u. a., dienen. Sie bestehen aus dem Unterbau mit dem Schienen-, Raupenfahrwerk oder Schreitmechanismus und dem Oberbau mit einem bis zu 165 m langen Ausleger, in dem ein Gurtbandförderer das Gut transportiert und an der Spitze abwirft. Sie werden heute meist nur noch als Bandabsetzer ausgeführt. Das Fördergut wird von Gurtbandfördereranlagen übernommen. Ältere Konstruktionen, wie die *Eimerketten-* und *Schaufelradabsetzer*, nehmen das Fördergut aus einem Graben mit einer Eimerkette oder Schaufelrad auf, die es dann auf die Gurtbandförderer übergeben. Die Eimerketten- oder Schaufelradaufnahmegeräte können mit dem eigentlichen Bandabsetzer gekoppelt sein oder werden als getrennte Geräte angeordnet. Mit einem Bandabwurfwagen (vgl. Abb. 10.3.1-3) wird das Gut von den Strossen-Gurtbandförderern direkt dem Aufnahme-Gurtbandförderer des Bandabsetzers übergeben. Zwischen den Strossen-Gurtbandförderern und den Bandabsetzern werden auch *Bandwagen* (Abb. 10.4.2-1) angeordnet. Das sind auf Raupenfahrwerken bewegliche und schwenkbare Geräte mit durchgehendem oder getrenntem Gurtbandförderer für den Aufnahme- und den Abwurfausleger. Sie werden auch als Zwischenförderer bezeichnet. Bandabsetzer erreichen Durchsätze bis zu 15400 m^3/h.

Eine modifizierte Form der Bandabsetzer sind die mit Raupen- oder Schienenfahrwerken ausgerüsteten *Haldenschütt-* und *Haldenrückgewinnungsgeräte* für große Massengutlagerplätze. Sie werden auch als kombinierte Geräte für das Schütten und Rückgewinnen von der Halde ausgeführt.

10.4.3. Abraumförderbrücken

Abraumförderbrücken (Abb. 10.4.3-1) sind spezielle Fördermittel für Tagebaue zum direkten Transport des Abraums von der Baggerseite über das Kohleflöz zur Kippenseite (Tafel 2). Sie sind die größten auf Schienenfahrwerken beweglichen Brückenkonstruktionen der Technik. Voraussetzung für den optimalen Einsatz sind annähernd horizontale Lage des Flözes, gerade Feldgrenzen und mindestens 1 500 m Strossenlänge. Bei mehrteiligen Abraumförderbrücken bestehen diese aus der *Hauptbrücke* mit dem Ausleger und einer oder mehrerer Nebenbrükken, die entsprechend ihrer Funktion als *Quer-*, *Zwischen-* oder *Zubringerbrücken* bezeichnet werden. Innerhalb der Brücken dienen ein oder mehrere übereinander angeordnete Gurtbandförderer als die eigentlichen Fördermittel. Die Hauptbrücke stützt sich baggerseitig um einige Meter längsverfahrbar auf einem Rollentisch und um ± 25° schwenkbar auf einer Stützenkonstruktion mit Schienenfahrwerken ab. Die haldenseitige Stützkonstruktion ist mit der Hauptbrücke fest verbunden. Das Fahrwerk ist ebenfalls schwenkbar. Die Nebenbrücken sind meist verfahrbar, jedoch immer schwenkbar untereinander und mit der Hauptbrücke verbunden. Die größte Abraumförderbrücke hat eine Stützweite von 272 ± 13 m und eine Auslegerlänge von 190 m. Der Durchsatz erreicht 34 800 m^3/h. Einschließlich der Nebenbrücken ergeben sich Überbrückungslängen von der Bagger- zur Kippenseite von über 600 m.

10.4.4. Hilfsgeräte

Neben den Tagebaugeräten und den Gurtbandförderern sind zur Mechanisierung und Rationalisierung der Montage, Instandhaltung und Reparatur sowie zur Energieversorgung der Geräte, zur Sicherung des technologischen Ablaufs in den Tagebauen und anderswo zusätzliche Geräte notwendig. *Hebezeuge* und *Lastaufnahmemittel* werden bei der Montage, Instandhaltung und Reparatur eingesetzt. *Bagger* und *Baumaschinen* dienen zur Herstellung des Planums, von Auffahrrampen, Einschnitten, Entwässerungsgräben, Bohrlöchern usw. *Eimerkettenaustauschgeräte* können einen Teil der Eimerkette aufnehmen. Sie dienen zum Transport derselben von der Werkstatt zum Bagger und zum mechanisierten Austausch der Eimerkette. Sie fahren auf den Schienen im Tagebau und haben zum Übersetzen noch zusätzlich Querraupenfahrwerke. Die *Energieversorgungsgeräte* sind u. a. die *Leitungstrommeln*, welche die Leitungskabel aufnehmen und entsprechend dem technologischen Fortschritt auslegen oder aufwickeln. Sie können bis zu 1 400 m Leitungstrosse speichern. Die *Vulkanisiergeräte* dienen der Endlosverbindung von Gurten und Energieleitungen. *Bandwagen* (vgl. Abb. 10.4.2-1) überbrücken technologisch bedingte Abstände zwischen den Geräten und Anlagen. *Grabenschöpfgeräte* sind im Prinzip kleinere Eimerketten- oder Schaufelradbagger zur Aufnahme von geschüttetem Gut aus einem Graben. Der Graben wird meist an der Übergangsstelle vom Zugbetrieb zur Förderung mit Gurtbandförderern angelegt.

10.5. Lastaufnahmemittel

Lastaufnahmemittel sind die Arbeitsmittel zur Beförderung von Lasten mit unstetig arbeitenden Fördermitteln, besonders Hebezeugen. Sie bilden das Bindeglied zwischen der Last und dem Fördermittel. Die Bauart ist von der Last und dem Hebezeug abhängig.

10.5.1. Anschlagmittel

Anschlagmittel dienen zum Anschlagen und Befördern von Einzellasten oder zu einer Ladungseinheit zusammengefaßten Lasten, wie Container, Bündel von Walzprofilen, auf Paletten gestapelte Säcke, Kisten, Kartons, Ziegelsteine u. a. Das Anschlagmittel wird ganz oder teilweise um die Last geschlungen oder in Ösen oder Haken eingehängt. Zu den Anschlagmitteln gehören *Seile* aus Naturfasern oder *Drahtseile*, *Ketten* aus Rundgliedern oder Laschen, *Anschlagbänder* aus Textilgurt, Gummigurtband oder Drahtgeflechte, *Brooken*, große Netze, in

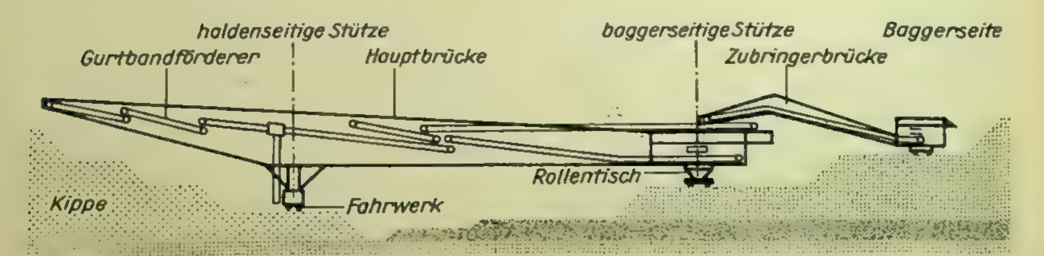


Abb. 10.4.3-1 Abraumförderbrücke

die die Lasten gelegt werden, *Seil-* und *Kettengehänge*, Haken und Schäkel. Sie müssen mit der Tragfähigkeit und dem Querschnitt gekennzeichnet werden. Entsprechend der Häufigkeit der Benutzung sind sie monatlich oder halbjährlich zu kontrollieren und zu warten.

10.5.2. Lastaufnahmemittel für Stückgut

Haken und die Schäkel sind Anschlag- und Lastaufnahmemittel. Der *Lasthaken* (vgl. Abb. 16.1.7-4) bleibt immer mit dem Hebezeug verbunden, an den mittels der Anschlagmittel die Last angehängt wird. Je nach Tragfähigkeit wird er als Einfach- oder Doppelhaken ausgebildet. Der *Schäkel* besteht aus einem Schmiedeteil, 3 miteinander gelenkig verbundenen Elementen oder ist ein aus Rundstahl gebogener Bügel, dessen Enden als Augenstab ausgebildet sind und der mit einem Gewindebolzen geschlossen wird. Die geschlossenen Schäkel sind für höchste Belastungen geeignet. Die Lasthaken und Schäkel mit Gewindekopf werden für *Hakenflaschen* (Abb. 10.5.2-1a), die Ösenhaken für *Hakengeschirre* (Abb. 10.5.2-1b) verwendet, die die Belastungen über die Drahtseile auf die Winde übertragen und durch diese auf- und abgewickelt werden. Die *Traversen* sind Tragbalken, an denen sperrige Lasten, wie Träger, Binder, Rohre u. a., angeschlagen werden. Sie selbst werden an den Lasthaken angehängt. *Gehänge* (vgl. Abb. 10.3.1-6) werden den Abmessungen und Formen des Förderguts angepaßt und auch bei Hängebahnen und Stetigförderern angewendet. *Zangen, Klemmen* und *Greifzeuge* (Abb. 10.5.2-2) können ohne Anschlagmittel die Lasten durch Form- oder Reibschluß halten. Sie werden selbst in die Lasthaken eingehängt. Der *Lasthebemagnet* dient zum Transport von Fördergütern mit ferromagnetischen Eigenschaften. Ihr Einsatz erfolgt vorwiegend auf Schrottlagerplätzen. *Vakuumlasthaftgeräte* (Abb. 10.5.2-3) bestehen aus dem Pumpenaggregat, dem Vakuumbehälter und einem oder mehreren Saugnäpfen oder -tellern, die sich an den Lasten, wie Tafeln oder Platten aus Blech, Glas, Beton u. a., festsaugen können und einen sicheren Transport gewährleisten (Tafel 39).

10.5.3. Lastaufnahmemittel zur Ladungsbildung

Zur Rationalisierung und Mechanisierung von TUL-Prozessen ist es notwendig, größere Ladungseinheiten, bestehend aus mehreren Einzellasten oder Stückgütern, zu bilden. Dazu werden *Paletten* oder *Stapelplatten* mit den standardisierten Abmessungen 800 mm × 1 200 mm oder 1 200 mm × 1 600 mm und einer Tragfähigkeit von 10 kN verwandt. Sie können von Flurförderzeugen (vgl. 10.8.) unterfahren, angehoben und transportiert werden. *Boxpaletten* haben

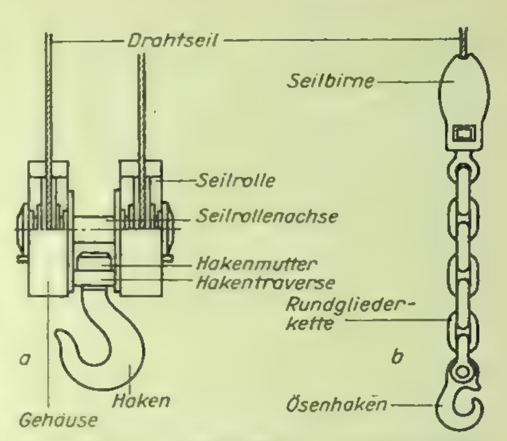


Abb. 10.5.2-1 a Hakenflasche, b Hakengeschirr

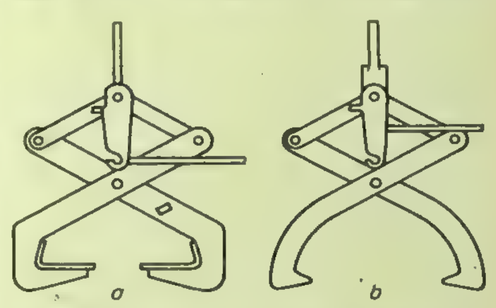


Abb. 10.5.2-2 a Profilstahlzange, b Holzstammzange

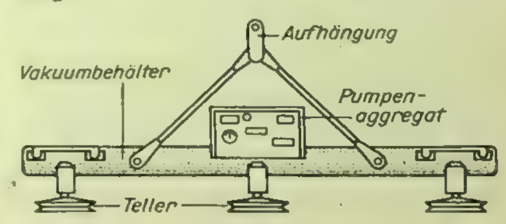


Abb. 10.5.2-3 Vakuumlasthaftgerät

970 mm hohe Seitenwände, nehmen druckempfindliche Güter auf und können vierfach übereinander gestapelt werden. *Ladepritschen* haben Kufen oder Füße und besitzen eine größere Bodenfreiheit als Paletten. *Behälter* gibt es in den verschiedensten Abmessungen. Sie können meist übereinandergestapelt werden. *Lagersichtbehälter* mit Nutzvolumen von 1 bis 100 dm^3 haben Sicht- und Eingriffsöffnungen. Das Lagergut kann ohne Umstapeln ein- und ausgelagert werden. *Transportbehälter* sind für den Transport und die Lagerung von Stückgütern vorgesehen. Es gibt 5 Größen mit den Abmessungen 190 mm × 285 mm der Größe IV bis 760 mm × 1 140 mm der Größe 0. Sie können in

Regalen wie auch übereinander gestapelt werden.. *Kleinbehälter* mit und ohne Rollen mit Ladevolumen von 0,75, 1,00, 2,00 und 3,00 m^3 werden von der Deutschen Reichsbahn verwendet. Sie sind wie die Paletten mit Flurförderzeugen zu unterfahren und zu transportieren. *Großbehälter* für 2,5 t und 5,1 m^3 Laderaum und 5,0 t und 4,2 bis 10,8 m^3 Laderaum sind mit Türen ausgestattet. Sie können nur mit schweren Flurförderzeugen oder Kranen bewegt werden. *Container* mit 10', 20' und 40' Länge und 8' Breite setzen sich als Großbehälter immer mehr durch. Sie werden von Kranen mit Spezialanschlagmittel, dem *Spreader*, u. a. speziellen Fördermitteln umgeschlagen.

10.5.4. Lastaufnahmemittel für Schüttgüter

Schüttgüter werden von Behältern, Kübeln oder Greifern aufgenommen. *Kübel* sind geschlossene Behälter, die um eine Achse kippbar als *Kippkübel*, mit aufklappbaren Seitenwänden als *Klappkübel* und mit einer Entleervorrichtung im Boden als *Bodenentleerer* verwendet werden. Sie können sich nicht selbst füllen und müssen beladen werden. *Greifer* sind die am meisten eingesetzten Schüttgut-Umschlagmittel. Sie nehmen das Gut selbständig auf durch das Schließen der geöffneten Schalen. *Einseilgreifer* haben nur ein Windwerk zum Schließen und anschließendem Heben des Greifers, unabhängig davon, ob der Greifer an einem Drahtseil oder 2 Strängen eines Flaschenzugs hängt. Das Öffnen und Entleeren wird durch besondere Ausklinkvorrichtungen eingeleitet. Der Zweischalen-Vierseilgreifer (Abb. 10.5.4-1) wird auch als *Stangengreifer* bezeichnet, weil die Schalen durch Stangen mit der oberen Traverse verbunden sind. Mehrseilgreifer erfordern stets 2 Windwerke, je eines zum Halten und Heben und eines zum Schließen und Öffnen der Schalen, die unabhängig voneinander gesteuert werden können. *Mehrschalengreifer*, früher auch als *Polypgreifer* bezeichnet, haben mehrere ringförmig angeordnete Schalen. Der *Trimmgreifer* hat eine extrem große Greifweite, wodurch z. B. bei der Schiffsentladung auch die entferntesten Ecken in den Luken erreicht werden können. Beim *Hydraulikgreifer* werden die Bewegungen der Schalen durch Hydraulikzylinder, beim *Motorgreifer* durch einen Elektromotor ausgeführt.

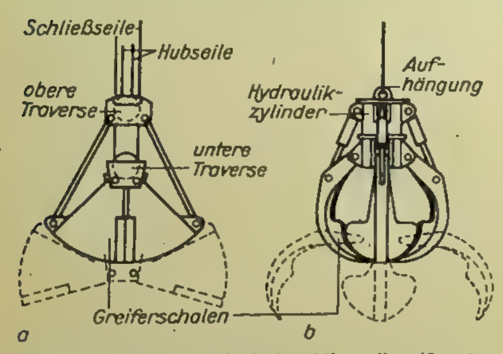


Abb. 10.5.4-1 *a Zweischalen-Vierseilgreifer, b Mehrschalen-Hydraulikgreifer*

10.6. Hebezeuge

Hebezeuge sind eine Gruppe von Fördermitteln, die vorwiegend für den vertikalen Transport von Stückgütern verwendet werden. Darüber hinaus ist auch der horizontale Transport und die Überlagerung dieser Bewegungen der Last möglich.

10.6.1. Kleinhebezeuge

Kleinhebezeuge sind vorwiegend stationäre Hebezeuge mit relativ geringer Hubhöhe, die durch die konstruktive Gestaltung begrenzt wird. Bei größeren erforderlichen Hubhöhen werden Ketten oder Drahtseile als zugkraftübertragende Elemente eingesetzt.

Zahnstangenwinden bestehen aus einer Zahnstange, die im einfachsten Falle für nur geringe Tragfähigkeiten direkt von einem Ritzel mit 4 bis 5 Zähnen bewegt wird. Für größere Tragfähigkeiten wird sie mit einem Stirnradgetriebe ausgerüstet, welches von einer Handkurbel angetrieben wird. Die Handkraft soll 250 N nicht überschreiten. Das Absinken der Last wird durch eine Gewindebremse sowie Sperrad und -klinke verhindert. Die Anwendung erfolgt in der Montage und Instandhaltung als Wagenheber, Gleiswinde u. a. Der Hubweg beträgt bis zu 300 mm, die Tragfähigkeit in der Regel bis zu 150 kN.

Schraubenwinden haben eine Gewindespindel und eine Mutter. Für größere Tragfähigkeiten wird diese als Schneckenrad ausgeführt und das dazugehörige Ritzel durch eine Handkurbel oder Ratsche bewegt. Das Gewinde der Spindel ist mit einer Steigung von 4 bis 5° selbsthemmend, so daß das Absinken bei Belastung verhindert wird. Schraubenwinden werden in der Montage und Instandhaltung als Wagenheber u. a. eingesetzt. Der Hubweg beträgt bis zu 300 mm, die Tragfähigkeit bis zu 150 kN. Mit elektrischem Antrieb werden sie bei Zugbeanspruchung der Spindel auch für größere Hubwege und Tragfähigkeiten als Achssenken, Auslegereinziehwerke für Krane, Hebemechanismen für Schiffshebewerke u. a. verwendet.

Heber. Der *hydraulische Heber* (Abb. 10.6.1-1) besteht aus einer Pumpe und dem Arbeitszylinder mit dem Hubkolben. Er kann in Blockbauweise oder getrennt – Pumpe und Zylinder durch Schläuche verbunden – angewendet werden. Die

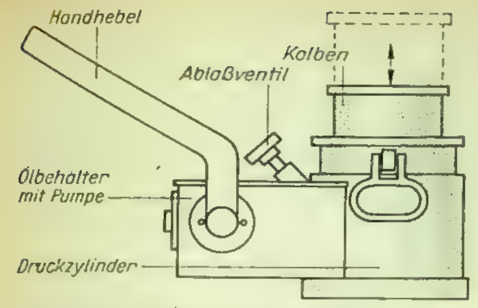


Abb. 10.6.1-1 Hydraulischer Heber

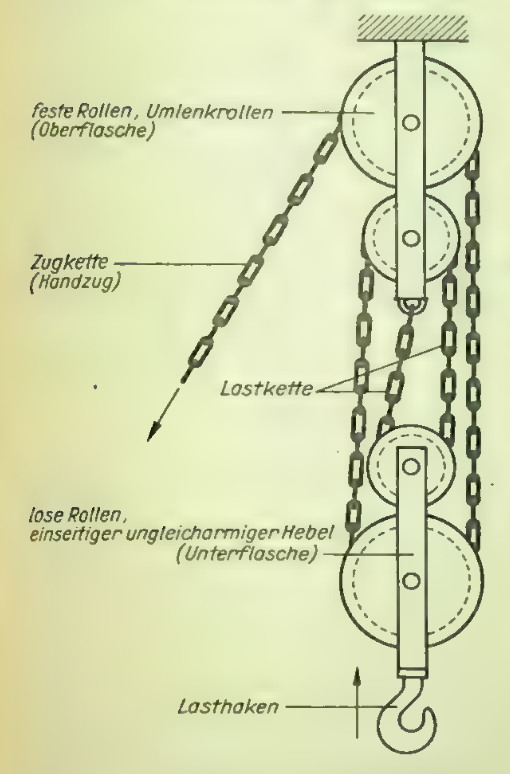


Abb. 10.6.1-2 Prinzip eines Differentialflaschenzugs

Hydraulikflüssigkeit ist ein Öl oder Wasser/Glyzerin-Gemisch. Der Hubweg überschreitet meist 160 mm nicht. Die Tragfähigkeit erreicht 3 MN bei einem Arbeitsdruck von 70 MPa. Mit einfachen Hydraulikzylindern können bei kleineren Tragfähigkeiten Hubwege bis 1 250 mm, mit Teleskopzylindern wesentlich größere Hubwege realisiert werden. Die Anwendung erfolgt als Schwerlast-, Wagenheber, Antrieb der Arbeitsorgane von Hebebühnen, Baggern, Kranen u. a. Der *pneumatische Heber* (Drucklufttheber) verwendet Luft als Arbeitsmedium. Er eignet sich zum Einsatz in explosionsgefährdeten Räumen. Bei Arbeitsdrücken von 0,6 MPa werden Tragfähigkeiten bis 30 kN und 1 250 mm Hubweg erreicht.

Kettenwinden. Ihr gemeinsames Merkmal ist eine kalibrierte Rundglieder- oder eine Stahlgelenkkette, die die Belastung aufnimmt und überträgt. Der Antrieb der Lastkette erfolgt über ein Getriebe mit der Hand- oder Haspelkette oder einem Elektromotor. Beim *Stirnradzug* (Abb. 10.6.1-2) ist zwischen dem Antrieb und dem Kettenrad für die Lastkette ein Stirnradgetriebe zwischengeschaltet. Eine Lastdruckbremse, als Lamellen- oder Kegelbremse ausgeführt, hält die Last. Beim *Schneckenradzug* wird ein Schneckenradgetriebe mit Selbsthemmung verwendet. Je nach der Übersetzung der Getriebe können Tragkräfte bis 100 kN, seltener darüber, erreicht werden. Die Hubgeschwindigkeit liegt unter 0,5 m/s.

Seilwinden benutzen zur Übertragung der Belastungen und zur Bewegung der Lasten ein Drahtseil. Die Seiltrommel wird über ein Getriebe von Hand oder durch einen Motor angetrieben. Der Hubweg wird nur durch die Trommelabmessungen und die Seillänge begrenzt. Das Drahtseil kann über einen Flaschenzug geführt werden. Die Last wird dann an der Hakenflasche (vgl. Abb. 10.5.2-1a) befestigt. So können Massen bis 1 kt gehoben werden. Je nach der Art des Antriebs, der Anwendung, Anordnung der Seilwinde, vorwiegendem Einsatzort, Funktion u. a. werden die Seilwinden als *Hand-* oder *Wandwinde* (Abb. 10.6.1-3), *Elektrozug* (Seilzug, Elektroflaschenzug usw.), *Universalwinde*, *Spill* (Spillwinde) bezeichnet. Seilwinden werden als Bauaufzug, Hubwerk, Laufkatze, Spannwinde, Greiferwindwerk, Aufzugswinde, Schachtfördermaschine u. a. angewendet.

Laufkatzen sind auf Schienen oder Drahtseilen fahrbare Seilwinden, die die Lasten vertikal und zusätzlich horizontal bewegen können. *Einschienenlaufkatzen* benutzen ein Walzprofil oder eine Schiene als Fahrbahn. Im einfachsten Falle kann eine Ketten- oder Seilwinde mit einem Fahrwerk

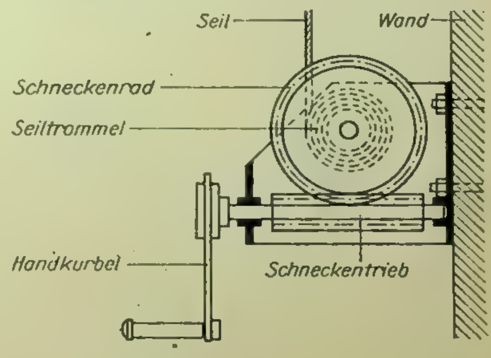


Abb. 10.6.1-3 Wandwinde

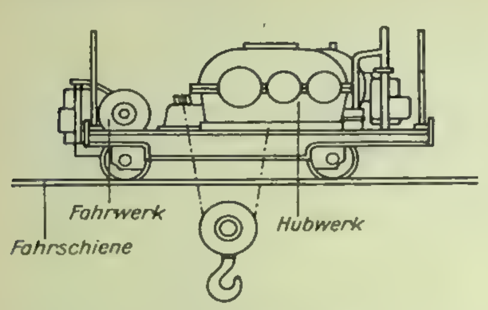


Abb. 10.6.1-4 Brückenkranlaufkatze

aus 2 Rädern ausgerüstet und von Hand bewegt werden. Höheren Anforderungen wird der elektrische Fahrwerksantrieb gerecht. *Unterflanschlaufkatzen* (Tafel 37) benutzen die unteren Flansche von Walzprofilträgern oder Abkantprofilen als Fahrbahn. Sie werden bei Hängebahnen und -kranen verwendet. Bei den *Seilzuglaufkatzen* wird die Katze durch ein Drahtseil hin- und hergezogen. Das Hubwerk kann auf der Katze oder wie die Seilwinde für das Fahrwerk stationär aufgestellt werden. Die Fahrwerksseile werden fest mit der Katze verbunden, die Hubwerksseile über die auf der Katze angeordneten Seilrollen geführt. *Zweischienenlaufkatzen* (Abb. 10.6.1-4) haben grundsätzlich 4 Fahrwerksräder, von denen 2 durch einen Elektromotor angetrieben werden; das Hubwerk ist fest auf dem Katzrahmen angeordnet. *Drehlaufkatzen* können zusätzlich noch das gesamte Hubwerk drehen. *Greiferlaufkatzen* haben ein für den Greiferbetrieb geeignetes Windwerk (vgl. 10.2.2.).

10.6.2. Krane

Krane sind unstetig arbeitende Fördermittel zum Transport von Stückgütern oder zu Ladungseinheiten zusammengefaßten Stück- und Schüttgütern. Das charakteristische Merkmal ist eine Hubvorrichtung, eine ortsfeste oder mit Fahrwerken ausgerüstete Seilwinde. Es werden Brükken-, Portal-, Ausleger- und Kabelkrane unterschieden.

Brückenkrane. Der Brückenkran besteht aus einem parallel- oder kreisverfahrbaren Brückenträger, der je nach der Spannweite und der Tragkraft aus einem Walzprofilträger, einer Fachwerk- oder Vollwandkonstruktion aufgebaut ist und einer darauf verfahrbaren Laufkatze, deren Seilwinde die Last heben oder senken kann. Die Arbeitsfläche der Brückenkrane ist kreisförmig oder rechteckig, indem die Kranbrücke kreisförmig oder längs verfahren wird und die Laufkatze sich dazu quer bewegt. Brückenkrane arbeiten immer auf hochgelegenen Fahrbahnen und behindern die darunter liegenden Arbeitsflächen nicht. Sie werden in Werk-, Montage- und Maschinenhallen sowie auf Lagerplätzen eingesetzt. Wegen der zu beachtenden Anfahrmaße, den Abständen zwischen der Mitte der Kranbrücke und der Mitte der Laufkatze und der Fahrbahnbegrenzung oder der Wand, ist die Arbeitsfläche kleiner als die Fläche unter dem Kran oder die Grundfläche der Halle. Im Verhältnis zur Nutzlast ist die Eigenlast relativ groß. Die einfachste Bauart ist der *Handlaufkran* mit Handantrieb für die Hubwinde und das Fahrwerk. Er wird nur noch selten angewendet. Der *Hängekran* zeichnet sich durch seine leichte Konstruktion aus. Er besteht meist nur aus standardisierten Bauelementen. Die Fahrbahnen für die Kranbrücke und die Laufkatze in Form eines Elektrozugs bestehen aus Walzprofilträgern, die an den Deckenkonstruktionen von Hallen oder Gebäuden angehängt werden. Sie sind besonders für den nachträglichen Einbau in vorhandene Bausubstanz geeignet und dienen damit der Rationalisierung und Mechanisierung. Die Tragkräfte reichen bis zu 32 kN, selten noch darüber. Der *Brücken-* oder *Laufkran* in Fachwerk- oder Vollwandbauweise hat meist außer der Hubwinde noch ein Hilfshubwerk für geringere Tragkräfte. Brückenkrane erreichen Tragkräfte bis zu 1 MN, in Sonderfällen auch bis zu 5 MN. Die Laufkatzen können auch für spezielle Einsatzbedingungen mit Sonderausrüstungen, wie Spreader für Container, ausgeführt werden. Bei den *Stapelkranen* zur Bedienung von Lagerräumen weist die Laufkatze eine drehbare Säule auf, an der eine heb- und senkbare Stapeleinrichtung angeordnet wird. *Lokomotiv-* und *Waggonhebekrane* haben entweder 2 Laufkatzen auf einer Kranbrücke oder 2 auf einer Kranfahrbahn angeordnete Krane, die auch gemeinsam ge-

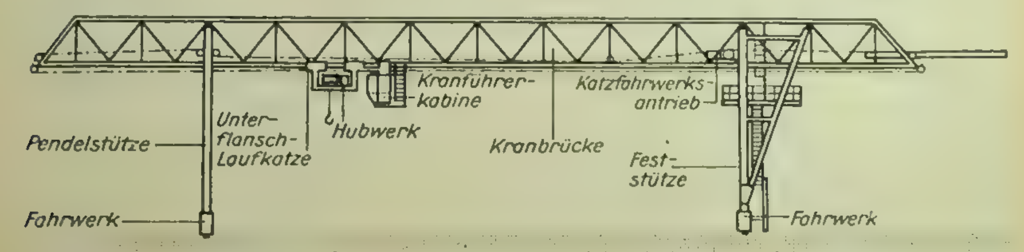


Abb. 10.6.2-1 *Portalkran*

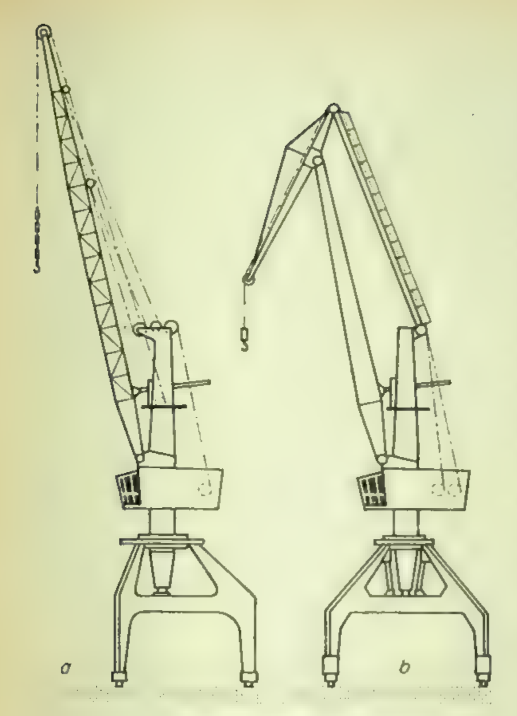


Abb. 10.6.2-2 Wippdrehkrane, a Einfach- und b Doppellenker

steuert werden und die Last über eine Traverse aufnehmen. *Gießereikrane* dienen dem Transport der Gießpfannen in den Gießereien. Die Laufkatzen haben ein Hubwerk, das die Gießpfanne trägt, und ein zweites, das zum Kippen der Gießpfanne bestimmt ist. Zu den *Stahl-* und *Walzwerkskranen* oder *Hüttenwerkskranen* gehören die Gießbettkrane zur Vorbereitung von Gießbetten, die Schlagwerkskrane und Masselverladekrane zum Brechen und Verladen von Masseln, Magnetkrane, die mit Lasthebemagneten ausgerüstet sind und auf den Schrottlagerplätzen zum Verladen von Schrott verwendet werden. Fallwerkskrane zerkleinern den Schrott, Muldentransportkrane manipulieren die Mulden mit besonderen Gehängen, Muldenbeschick- oder Chargierkrane haben eine Drehlaufkatze mit einer speziellen Beschickvorrichtung. Abstreifer- oder Stripperkrane haben Zangen zum Halten der Kokillen und Stempel zum Ausstoßen der Blöcke. Pratzenkrane sind für den Transport von langem Fördergut, z. B. Stangen, konstruiert. *Schmiedkrane* haben Vorrichtungen zum Halten und Drehen von Schmiedestücken.

Portalkrane (Abb. 10.6.2-1) bestehen aus einem auf ebener Erde verfahrbaren Portal, das einen Lagerplatz oder ein bzw. mehrere Gleise überspannt, und dem Kranteil (Laufkatze, Auslegerkran). Sie können ortsfest, parallel- oder kreisverfahrbar ausgeführt werden. Stehen beide Stützen des Portals auf gleicher Höhe, so werden diese Krane als *Vollportalkrane* bezeichnet (Tafel 37). Ist eine Fahrbahn höher gelegen und somit eine Stütze kürzer als die andere, dann sind es *Halbportalkrane*. Sie können ortsfeste Seilwinden oder Laufkatzen haben. Portalkrane werden zum Umschlag auf kleineren Bahnhöfen, auf Lagerplätzen für Stück- und Schüttgut, in Häfen und anderswo eingesetzt.

Auslegerkrane. Ihr Ausleger, der über die Stützfläche des Krans hinausragt, kann fest, einstellbar, einziehbar, wippfähig, aufsteckbar, teleskopartig ausschiebbar oder durch eine Laufkatze befahrbar gestaltet sein. Der Auslegerkran selbst kann feststehend, schienenfahrbar oder freizügig ortsveränderlich sein und auf dem Lande oder als Schwimm- oder Schiffskran auf dem Wasser eingesetzt werden. Ist der Ausleger um eine vertikale Achse drehbar, dann bezeichnet man diese Krane als *Drehkrane*. Die Arbeitsfläche der Auslegerkrane ist bei ortsfester Ausführung ein Kreisring oder -segment, das durch die verfahrbare Ausführung gestreckt werden kann. Nach der Art der Drehverbindung zwischen dem drehbaren Oberteil und dem Rahmen mit dem Fahrwerk unterscheidet man den *Säulendrehkran* mit fester oder drehbarer Säule. Der Ausleger kann starr oder heb- und senkbar sein. Beim einfachen Auslegerdrehkran wird die Last

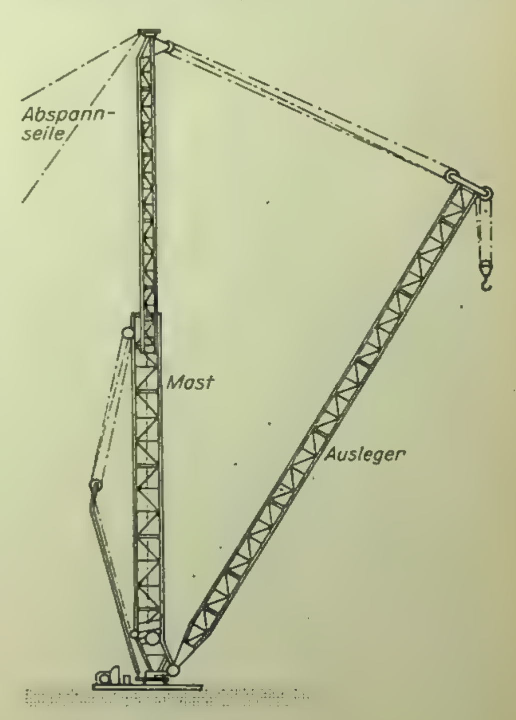


Abb. 10.6.2-3 Derrickkran

beim Heben oder Senken des Auslegers um einen bestimmten Betrag gehoben oder gesenkt. Diesen Nachteil vermeidet der als Ein- oder Doppellenker ausgeführte *Wippdrehkran* (Abb. 10.6.2-2), bei dem die Last durch entsprechende Mechanismen horizontal geführt werden kann. Die einfachste Bauart des Säulendrehkrans ist der *Wanddrehkran*, der an oder in der Nähe einer Wand aufgestellt wird. Der *Einschienenkran* stützt sich unten auf einer Schiene und oben meist an der Decke des Gebäudes ab. Der *Masten-* oder *Derrickkran* (Abb. 10.6.2-3) besteht aus einem mit Drahtseilen abgespannten Mast, an dessen Fuß ein Ausleger gelenkig angeschlossen ist. Die Seilwinden für die Last und das Bewegen des Auslegers sind auf einem Rahmen montiert, auf dem auch der Mast abgestützt wird. Mastenkrane werden hauptsächlich bei der Montage schwerer Einzellasten in Tagebauen, Chemiewerken usw. eingesetzt. Der Grundrahmen kann auch mit einem Fahrwerk ausgerüstet werden. Die auf Schiffen anzutreffenden *Ladebäume* sind ebenfalls Mastenkrane. Den Einsatzbedingungen im Bauwesen angepaßt sind die *Kletterkrane*. Sie können entsprechend der zunehmenden Höhe der Bauwerke um ein oder mehrere Stockwerke mit Hilfe einer im Mast eingebauten Seilwinde klettern. Dabei werden Mastsegmente eingesetzt. Der *Turmdrehkran* hat

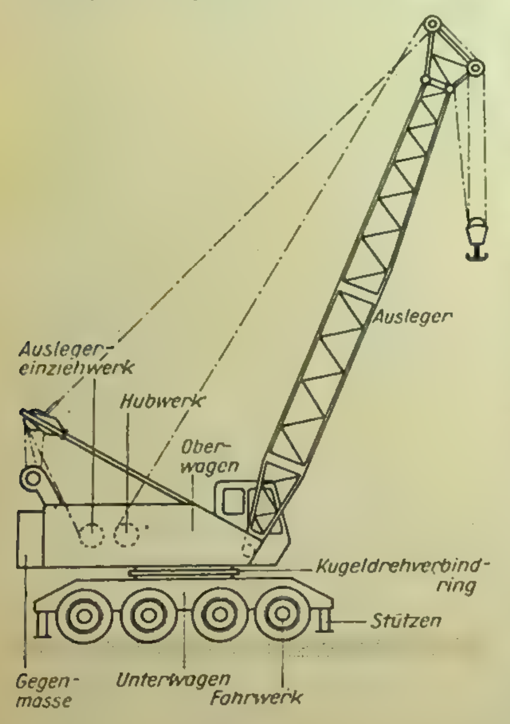


Abb. 10.6.2-4 Mobildrehkran

eine besonders hohe feste oder drehbare Säule mit einem starren oder heb- und senkbaren Ausleger (Tafel 55). Bei den straßenfahrbaren Turmdrehkranen kann der Ausleger und der gesamte Turm in eine horizontale Lage abgesenkt werden. Der Unterwagen erhält dann zusätzlich eine oder mehrere luftbereifte Achsen für den Transport. Der Einsatz erfolgt im Wohnungs-, Industrie- und Hochbau. Das Lastmoment erreicht bis $1{,}2 \cdot 10^6$ Nm. Bei starren Auslegern werden Seilzugkatzen verwendet. Turmdrehkrane sind auch als Schwerlastkrane in Häfen und Schiffswerften zu finden. Weitere Bauformen der Auslegerkrane sind *Wippdrehkrane* für den Hafenbetrieb, *Bordwippkrane* auf Schiffen, die *Raupendrehkrane*, deren Unterbau mit Raupenfahrwerken ausgerüstet ist, *Autodrehkrane*, bei denen auf einem Rahmen eines Lastkraftwagens eine Kranausrüstung aufgebaut ist (Tafel 37) und *Mobildrehkrane* (Abb. 10.6.2-4), die mit speziellem Unterbau mit Luftreifenfahrwerken versehen sind. *Eisenbahndrehkrane* haben einen auf Schienen fahrbaren Unterbau (Tafel 37). Sie sind konstruktiv so gestaltet, daß sie im Zugverband mit 100 km/h Geschwindigkeit transportiert werden und teils auch unter elektrischen Oberleitungen arbeiten können. Schwerlastkrane erreichen Tragkräfte bis zu 1,25 MN. Bei den *Schwimmkranen* werden die Kranausrüstungen auf spezielle Schiffskörper, Pontons, aufgebaut. Schwimmkrane erreichen gegenwärtig eine maximale Tragkraft von 32 MN.

Kabelkrane bestehen aus 2 stationär, kreis- oder parallelverfahrbaren Masten oder Türmen, zwischen denen ein oder mehrere Drahtseile gespannt sind. Auf den Drahtseilen werden die Seillaufkatzen verfahren. Die Hub- und die Fahrwindwerke werden bei den fahrbaren Kabelkranen in einem der Türme, bei den ortsfesten in einem besonderen Windenhaus, aufgestellt. Kabelkrane werden an schwer zugänglichen Einsatzorten, wie Steinbrüche, oder zum Talsperrenbau eingesetzt. Die Spannweite kann 100 bis 1000 m betragen. Tragkräfte bis zu 0,2 MN können aufgebracht werden. Auf Hellingen setzt man bis zu 12 stationäre Kabelkrane nebeneinander zum Schiffbau ein. Zum Transport schwerster Lasten werden dann mehrere Seillaufkatzen verwendet, die über eine Traverse miteinander verbunden werden.

10.6.3. Hebebühnen

Hebebühnen bestehen aus einer Plattform mit oder ohne an einer oder mehreren Seiten angebrachtem Geländer oder Gitter und einem Hubmechanismus. Sie dienen je nach der ihnen zugeordneten Funktion und der konstruktiven Gestaltung als Hubeinrichtung für geringe Höhenunterschiede bis zu großen Hubhöhen.

Hubtische haben eine tischförmige Ebene in Form einer geschlossenen Platte oder eines Rahmens, dessen Innenfläche aus Rollen, Scheibenrollen oder Kugeln besteht, auf welche die Lasten manuell oder durch Fördermittel aufgegeben werden. Mit Hilfe des Hubmechanismus in Form der „Schere" mit mechanischem oder auch hydraulischem Antrieb (Abb. 10.6.3-1) kann der Hubtisch, dessen Hubhöhe in der Größenordnung von 1 m liegt, die Last vertikal in die gewünschte Höhenlage heben (Tafel 35). Hubtische sind wichtige Rationalisierungsmittel und werden in allen Bereichen der Volkswirtschaft eingesetzt.

Verladebühnen sind konstruktiv prinzipiell gleich aufgebaut wie die Hubtische und haben auch die gleiche Funktion zu erfüllen. Sie werden speziell bei der Be- und Entladung von Güterkraftwagen und Eisenbahnwaggons eingesetzt. Zu den Verladebühnen gehören auch die an den Güterkraftwagen befestigten, hydraulisch betätigten *Ladebordwände*, die Lasten von der Ebene der LKW-Ladefläche auf das Straßenniveau und umgekehrt bewegen.

Arbeitsbühnen bestehen aus der Plattform mit Geländer, deren Bewegung mit Hilfe von Hydraulikzylindern, Zahnstangenantrieben oder Seilwinden ausgeführt wird. Arbeitsbühnen dienen zur Montage, Wartung und Instandhaltung von Masten, Wänden usw. Die Hubhöhe wird durch den möglichen Hub der Hydraulikzylinder begrenzt. Größere Hubhöhen sind mit Zahnstangenantrieb möglich. Arbeitsbühnen können

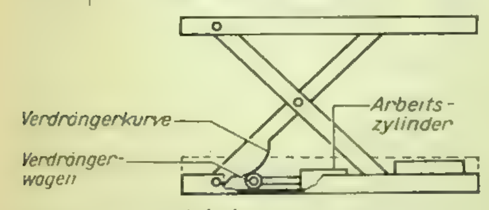


Abb. 10.6.3-1 Hubtisch

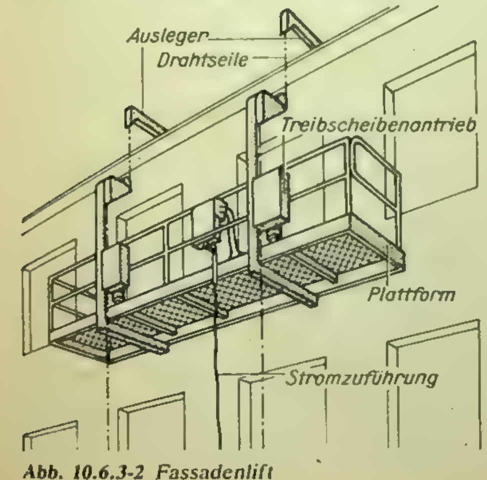


Abb. 10.6.3-2 Fassadenlift

auch für Arbeiten an der Straßenbeleuchtung, an Fahrleitungen der Straßenbahn und Eisenbahn eingesetzt werden. Sie werden dann auf straßen- oder schienenfahrbaren Fahrzeugen angeordnet. Abb. 10.6.3-2 zeigt eine mit Hilfe einer Seilwinde bewegte Arbeitsbühne, die wegen ihres speziellen Einsatzes zum Bau, zur Pflege und Instandhaltung von Gebäuden als *Fassadenlift* bezeichnet wird. Auf den ebenen Dächern moderner Gebäude wird ein stationärer oder fahrbarer Rahmen angeordnet. Die Seilwinde zum Heben und Senken der eigentlichen Arbeitsbühne ist auf dem Rahmen befestigt. Die Drahtseile werden über 2 kurze Ausleger, die über die Dachkante hinausragen, geführt. Die Bühne ist an den Seilenden befestigt. Eine andere konstruktive Ausführung basiert auf dem Treibscheibenprinzip. Hier befindet sich der Antriebsmotor mit dem Getriebe und den angetriebenen Seilrollen, welche die Funktion der Treibscheibe übernehmen, auf der Arbeitsbühne. Die Drahtseile werden an den Auslegern auf dem Dach befestigt und über die angetriebenen Seilrollen auf der Arbeitsbühne, die sie mehrfach umschlingen, geführt (vgl. 10.7.1.).

10.7. Aufzüge und Schachtförderanlagen

10.7.1. Aufzüge

Aufzüge, auch als Lifts bzw. fälschlich als Fahrstühle bezeichnet, können mit Kabine, Fahrkorb oder auch Plattform ausgebildet werden. Charakteristisch ist das an Schienen geführte Lastaufnahmemittel. Nach der Art des Antriebs unterscheidet man den Hand-, den elektrischen und den hydraulischen Aufzug. Nach der Funktion werden unterschieden Personenaufzüge mit Tragkräften bis zu 16 kN, Lastenaufzüge mit Tragkräften bis zu 50 kN, Kleinlastenaufzüge mit Tragkräften unter 1 kN, Schnellbau-, kombinierte Personen- und Lasten-, Umlauf-, Unterflur-, Kletteraufzüge und einige Sonderformen, die in Theatern, an Häuserwänden, in Schiffshebewerken u. a. Einsatzfällen angewendet werden. Die Hauptbauarten sind der Treibscheiben-, der Zahnstangen-, der hydraulische und der Umlaufaufzug. Die richtige Auswahl, besonders von Personenaufzügen, hinsichtlich der Tragfähigkeit, Fahrgeschwindigkeit, Abmessungen, Anzahl und Anordnung setzt eine Verkehrsberechnung voraus. Dabei müssen die Funktion des Aufzugs, die Anzahl der Stockwerke und deren Höhe und die Verkehrsfolge beachtet werden. Von diesen Einflußgrößen ist auch die Art der Aufzugssteuerung abhängig.

Treibscheibenaufzüge (Abb. 10.7.1-1) bestehen aus der Aufzugsmaschine mit der Treibscheibe,

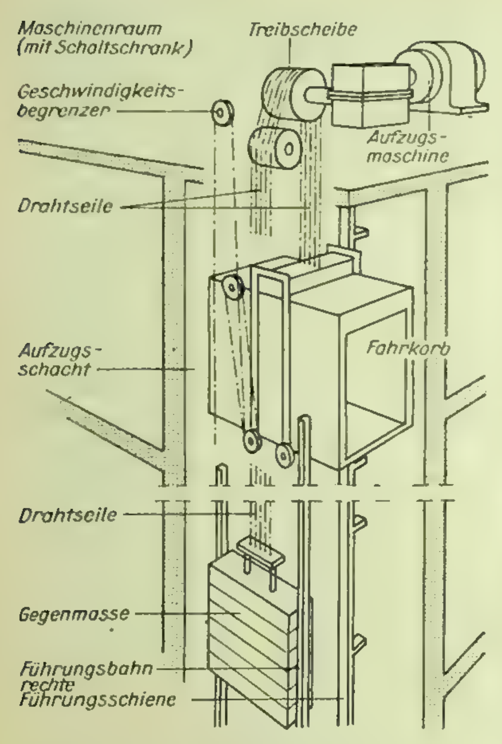


Abb. 10.7.1-1 Treibscheibenaufzug

den Drahtseilen, an deren Enden einerseits der Fahrkorb und andererseits die Gegenmasse befestigt sind, und dem Aufzugsschacht mit den erforderlichen Einbauten. Die Aufzugsmaschine wird für Personenaufzüge mit Fahrgeschwindigkeiten bis zu 2 m/s und einer Tragfähigkeit bis zu 10 kN oder dementsprechend 12 Personen mit einem Getriebe ausgeführt. Sie besteht aus einem geräuscharmen Gleichstrommotor, einer Bremse und einem mehrgängigen Schneckengetriebe. Für alle Fahrgeschwindigkeiten und Tragfähigkeiten verwendbar ist die getriebelose Aufzugsmaschine. Sie besteht aus einem niedertourigen Gleichstromnebenschlußmotor, auf dessen Welle die Bremsscheibe und die Treibscheibe direkt aufgezogen sind. Getriebelose Aufzugsmaschinen werden mit 2 voneinander unabhängigen Bremsen ausgerüstet. Die Gleichstrommotore werden mit einem Leonard-Satz geregelt und für 180 Fahrten in der Stunde sowie für eine Einschaltdauer von 60% ausgelegt. Durch Reibschluß zwischen der Treibscheibe und den (bis zu 8) Drahtseilen erfolgt die Kraftübertragung zum Bewegen des Fahrkorbs. Die Treibscheibe hat Rund-, Keil- oder unterschnittene Rillen, in denen die Drahtseile liegen. Sehr selten wird der *Trommelaufzug* angewendet, der mit Hilfe einer Seiltrommel den Fahrkorb auf- und abbewegt. Die Treibscheibe ist auf jeden Fall vorteilhafter als die Seiltrommel, da der Fahrkorb an mehreren Drahtseilen aufgehängt werden kann und damit eine noch größere Sicherheit vorhanden ist. Weiterhin sind die Abmessungen der Treibscheiben kleiner als die von Seiltrommeln. Die für Treibscheibenaufzüge notwendige Gegenmasse wird so bemessen, daß sie die volle Eigenmasse des Fahrkorbs und noch 50% der maximalen Nutzlast ausgleicht. So wird eine geringere Antriebsleistung benötigt. Bei Förderhöhen > 40 m wird auch die Eigenmasse der Drahtseile durch ein Unterseil ausgeglichen. Die Drahtseile für die Personenaufzüge müssen mit vierzehnfacher Sicherheit gegen Bruch bemessen werden. Die Befestigung der Drahtseile am Fahrkorb und an der Gegenmasse erfolgt einzeln über Federn oder Hebelgestänge. Außerdem müssen die Fahrkörbe mit Fangvorrichtungen ausgerüstet sein. Es gibt Sperr- und Gleitfangvorrichtungen sowie Fangbremsen. Fliehkraftregler überwachen und begrenzen die Fahrgeschwindigkeit des Fahrkorbs. Die normalen Fahrgeschwindigkeiten für Aufzüge betragen 0,25 bis 2,0 m/s. Für große Höhenunterschiede, die bei Hochhäusern und Fernsehtürmen auftreten, werden größere Fahrgeschwindigkeiten bis zu 9 m/s angewendet. In der Schachtgrube sind Aufsetzpuffer vorhanden. Die konstruktive Ausführung als dämpfender Anschlag, Feder- oder Ölpuffer ist von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Die Fahrkörbe für die Personenbeförderung bestehen aus einem steifen Rahmen, der allseitig verkleidet wird. Er wird mit Schiebegittern oder -türen, seltener noch mit Drehtüren ausgerüstet. An den Haltestellen werden die Fahrkorb- und Schachttüren synchron miteinander geöffnet und wieder verschlossen. Sicherheitseinrichtungen verhindern das Öffnen der Schachttüren außerhalb der Haltestellen.

Aufzugssteuerung. Die Art der Steuerung der Aufzüge hängt von der Funktion und der Verkehrsdichte ab. Nach der Konstruktion der Bedienungselemente gibt es die *Hebel-* und *Druckknopfsteuerung*, nach der Art die Führer-, Sammel- und Gruppensteuerung. Die *Führersteuerung* setzt einen geprüften Aufzugsführer voraus. Sie ist nur für spezielle Einsatzbedingungen geeignet, z. B., wenn nur wenige Haltestellen vorhanden sind. Der Fahrgast bedient in Restaurants, Warenhäusern, Fernsehtürmen u. a. einen Rufknopf. Der Aufzugsführer entscheidet dann, welche Haltestelle er zuerst anfährt und leitet die Bedienung ein. Für die *Sammelsteuerung* wird kein Aufzugsführer benötigt. Alle Fahrwünsche der Benutzer werden von der elektronischen Steuerung angenommen, gesammelt und entsprechend der Fahrtrichtung von der Aufzugskabine realisiert. Die in der Kabine befindlichen Fahrgäste melden durch Betätigen eines Druckknopfs das gewünschte Ziel an. Die Kabine hält an jeder Haltestelle an, die eingegeben wurde,

unabhängig von der Reihenfolge der Eingabe. Ein Leuchtzeichen über oder neben der Schachttür gibt dem Benutzer Auskunft, in welcher Richtung sich der ankommende Aufzug weiterbewegen wird. Die *Gruppensammelsteuerung* verbindet mehrere nebeneinander oder gegenüber angeordnete Aufzüge. Für alle Aufzüge einer Gruppe gibt es in jedem Stockwerk nur eine gemeinsame Bedienungstafel mit nur 2 Bedienknöpfen, je einen für die Bewegung nach oben und nach unten. Alle Fahrtwünsche werden angenommen und durch ein Lichtsignal bestätigt. Bei der Ankunft einer Aufzugskabine in einem Stockwerk wird wie bei der Sammelsteuerung angezeigt, in welcher Richtung sich die Kabine weiterbewegen wird. Die Gruppensammelsteuerungen sind bei großen Verkehrsdichten sehr ökonomisch. In verkehrsschwachen Zeiten wird dann das Prinzip der Parkhaltestellen durchgesetzt, indem je eine Aufzugskabine ein festgelegtes Stockwerk oder das Erdgeschoß anfährt und dort auf weitere Fahrtwünsche wartet. Den Parkhaltestellen werden bestimmte Förderbereiche zugeordnet. Solche Steuerungen arbeiten mit einem elektronischen Zweckrechner, der alle eingegebenen Fahrtwünsche so programmiert, daß für die Benutzer die kürzesten Wartezeiten erreicht werden. Feineinstelleinrichtungen sorgen für das genaue Einfahren in jede Haltestelle.

Zahnstangenaufzüge bestehen aus einem turmartigen Gerüst und einem Fahrkorb. An einer Seite oder an 2 gegenüberliegenden Seiten des fachwerkartigen Gerüsts ist eine Zahnstange befestigt. Der Antrieb, bestehend aus dem Antriebsmotor mit Bremse, einem Getriebe und dem Zahnrad (Ritzel), befindet sich auf dem Fahrkorb. Der Zahnstangenaufzug benötigt keinen Aufzugsschacht. Er kann an jeder beliebigen Stelle eingesetzt werden. Vorwiegend wird er im Bauwesen als Bauaufzug verwendet.

Hydraulische Aufzüge. Der Fahrkorb wird von einem einfachen oder Teleskop-Hydraulikzylinder auf- und abbewegt. Der Zylinder kann freistehend sein wie bei den Hebebühnen oder auch in einem Schacht angeordnet werden. Die Hubhöhe wird durch die Ausfahrlänge der Hydraulikzylinder begrenzt und überschreitet in der Regel 12 m nicht. Der Fahrkorb oder die Plattform werden am Kopf des Hubkolbens befestigt. Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt bei 0,5 m/s.

Umlaufaufzüge oder *Paternoster* sind stetig arbeitende Fördermittel für Lasten und Personen. Zwischen 2 parallellaufenden endlosen Ketten, die oben und unten über Kettenräder geführt werden, bewegen sich immer in gleicher Richtung die Lastaufnahmemittel. Die Arbeitsgeschwindigkeit überschreitet 0,3 m/s nicht. Beim *Personenumlaufaufzug* sind die Lastaufnahmemittel einseitig offene Kabinen, die an jedem Stockwerk von den Benutzern betreten oder verlassen werden können. Der Abstand der Kabinen entspricht genau der Stockwerkshöhe. Umlaufende Stückgutförderer werden nicht zu den Umlaufaufzügen gezählt und als Umlaufförderer bezeichnet.

Schrägaufzüge bestehen aus einem auf einer geneigten Ebene angeordnetem Gleis, dem Kübel oder einem anderen Lastaufnahmemittel und dem Antrieb. Das Lastaufnahmemittel wird entsprechend der Funktion und der Fördermenge gestaltet und mit Rädern ausgerüstet, die auf den Schienen des Gleises fahren können. Der Antrieb setzt sich aus einer Seilwinde mit elektrischem Antriebsmotor, Bremse, Getriebe und einer einfachen oder doppelten Seiltrommel zusammen. Am Drahtseil wird das Lastaufnahmemittel befestigt. Bei vorhandener Doppel-Seiltrommel wird an dem 2. Drahtseil die Gegenmasse befestigt, mit der zur Einsparung von Antriebsenergie ein Lastausgleich erreicht wird. Der Schrägaufzug wird zum Beschicken von Hochöfen, zum Herausbringen des gewonnenen Gesteins in Steinbrüchen (Tafel 39), im Bauwesen u. a. ähnlich gelagerten Gebieten verwendet.

10.7.2. Schachtförderanlagen

Schachtförderanlagen sind unstetig arbeitende Fördermittel speziell für den untertägigen Bergbau zum Transport von Menschen und Material von über nach unter Tage und umgekehrt. Die Beförderung von Menschen wird als *Seilfahrt*, die Förderung von Material als *Material-* oder *Produktenfahrt* bezeichnet. Auch bei den Schachtförderanlagen werden die Lastaufnahmemittel geführt. Eine Schachtförderanlage besteht aus der Fördermaschine mit Treibscheibe, einem oder mehreren Drahtseilen, den Förderkörben, -gestellen oder -gefäßen, dem Schacht mit -gerüst oder dem Förderturm. Die Treibscheibe wird von der Fördermaschine angetrieben und sitzt meist direkt auf der Welle der Fördermaschine. Nach dem Standort unterscheidet man die *Flurfördermaschine*, die zu ebener Erde neben dem Fördergerüst steht, und die *Turmfördermaschine*, die auf dem Fördergerüst unmittelbar über dem Schacht angeordnet ist. Der elektrische Antrieb ist vorherrschend. Meist wird dazu ein Gleichstromnebenschlußmotor (vgl. 11.2.1.) verwendet. Die notwendige Drehzahlregelung erfolgt durch die Leonard-Schaltung, die heute durch die moderneren Thyristor-Steuerungen abgelöst wird. Beim Ein- und Ausschalten entstehen erhebliche Stoßbelastungen im Energienetz. Zum Ausgleich dieser Netzbelastungen arbeitet der Ilgner-Umformer mit einem Schwungrad. Wird ein Drehstromasynchronmotor angewendet, dann sind Getriebe erforderlich. Die Fördermaschine wird durch den Fahrtregler gesteuert. Das wesentlichste Bauteil

ist die Kurvenscheibe, mit der die einzelnen Betriebsphasen, wie Anfahren, Beschleunigen, Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, Verzögern und Anhalten, vorgegeben sind. Jede Fördermaschine ist mit einer Fahr- und Sicherheitsbremse ausgerüstet. Der Teufenanzeiger sowie die Schachtsignal- und Fernsprechanlagen sorgen für eine optimale Sicherheit. Das Drahtseil, auch Förderseil genannt, wird von der Treibscheibe (vgl. Abb. 10.1.1-2) durch Reibschluß angetrieben, wodurch sich die an den Enden des Förderseils befestigten Förderkörbe auf- oder abbewegen. Die Förderseile haben bis zu 85 mm Durchmesser und werden täglich geprüft. Wegen der großen Teufen ist die Eigenmasse der Förderseile erheblich und wird durch Unterseile ausgeglichen. Besonders bei großen Drahtseildurchmessern ist die Belastung der einzelnen Drähte sehr unterschiedlich. Es müssen außerdem für die Treibscheibe und die Seilrollen große Durchmesser gewählt werden. Deshalb setzt sich die *Mehrseilförderung* durch, bei der die Förderkörbe an 4 bis 8, seltener 12 Drahtseilen aufgehängt werden. Bei der Anwendung von 4 Förderseilen reduziert sich bei gleichbleibendem Seilquerschnitt und gleichbleibender Eigenmasse der Seildurchmesser auf die Hälfte. Ein weiterer Vorteil der Mehrseilförderung ist die erhöhte Sicherheit. Die Fördergeschwindigkeit beträgt bei der Materialförderung bis 20 m/s, selten bis zu 30 m/s, bei der Seilfahrt in der Regel 6 bis 8 m/s, höchstens jedoch – bei sehr großen Teufen – 12 m/s. Außer den Treibscheiben werden auch *Seil-* oder *Spiraltrommeln* als Antriebsorgane für die Förderseile angewendet. Mit den Spiraltrommeln ist ein Lastmomentenausgleich möglich, und es werden keine Unterseile benötigt. *Bobinen* sind Seiltrommeln, auf denen Flachseile spiralförmig übereinander auf- und abgewickelt werden, wodurch ebenfalls der Lastmomentenausgleich erzielt werden kann (Abb. 10.7.2-1). Die *Förderkörbe* werden an Holzstangen, den Spurlatten, an Stahlschienen und neuerdings auch an Drahtseilen geführt. Sie sind die Lastaufnahmemittel für die Bergleute oder das Material. Bei der Förderung des Materials mit Förderwagen werden die Förderkörbe in mehrere Etagen unterteilt und als *Fördergestell* bezeichnet. Die Fördergestelle sind Stahl- oder Leichtmetallrahmen, deren Wände aus Drahtgittern oder gelochten Blechen bestehen, damit eine kleine Eigenmasse erzielt wird. Wird das Material als Schüttgut gefördert, dann werden *Fördergefäße* oder *Skips* verwendet. Es sind geschlossene Stahlblechbehälter mit minimaler Eigenmasse und einer Tragkraft von 60 bis 400 kN. Am Füllort wird das Fördergut aus einem Vorratsbunker, der Fülltasche, automatisch in den Skip gefüllt. Über Tage auf der Hängebank wird der Skip durch Öffnen eines Bodenverschlusses, eines seitlich angeordneten vertikalen Schiebers, oder durch Kippen in einen Bunker, die Aufnahmetasche, entleert. Bei der Skipförderung werden maximale Durchsätze erreicht und die Seilfahrt aus dem Hauptschacht in andere Schächte verlegt. Die Förderkörbe werden wie die Aufzugskabinen mit entsprechenden Fangvorrichtungen ausgerüstet. Bei zu hoher Fördergeschwindigkeit greifen sie in die Führungen ein, bremsen die Förderkörbe ab und setzen sie fest.

10.8. Flurförderzeuge

Flurförderzeuge, kurz *Flurförderer* genannt, sind Fahrzeuge für den innerbetrieblichen Transport in der horizontalen Ebene und zum Über-

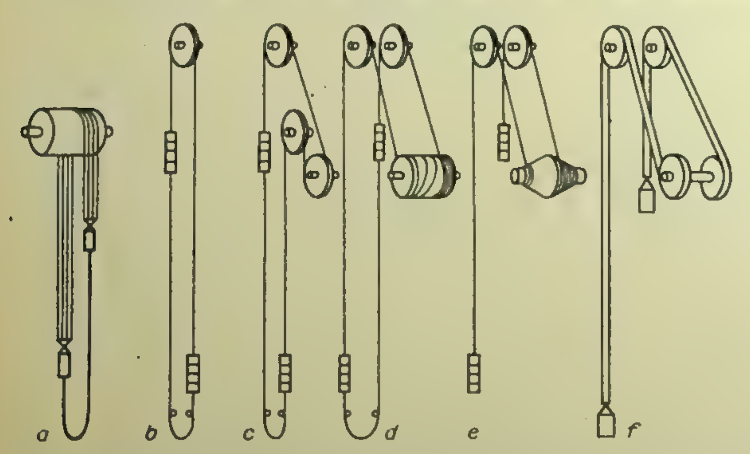


***Abb. 10.7.2-1** Seilführung und Antriebsorgane: **a** Mehrseil-, **b** Turmtreibscheiben-, **c** Flurtreibscheibenförderung, **d** Trommelförderung mit zylindrischen Trommeln und **e** mit Spiraltrommeln, **f** Bobinenförderung*

winden von geringen Steigungen. Gleisgebundene Flurförderzeuge sind nur noch selten anzutreffen. Die verschiedenen freizügig ortsveränderlichen Flurförderzeuge werden untergliedert hinsichtlich des Fahrantriebs, der als Benzin-, Diesel-, Elektro-, Leitungs-, Netz-, Preßluft-, Treibgas- oder Handantrieb ausgeführt werden kann, hinsichtlich der Lenkung, die eine Hand-, Geh-, Stand- oder Fahrersitzlenkung sein kann, und hinsichtlich der Bauform, wie Schlepper, Wagen, Stapler u. a. Flurförderzeuge.

10.8.1. Schlepper

Schlepper sind Flurförderzeuge mit einem Kraftantrieb zum Bewegen anderer Flurförderzeuge ohne Antrieb. *Einachsschlepper* haben nur eine Achse, die gleichzeitig auch angetrieben wird. Bei den *Zweiachsschleppern* kann eine Achse auch nur mit einem Rad ausgerüstet sein. Beim *Sattelschlepper* wird der zu bewegende Flurförderer auf den Schlepper aufgesetzt. Er hat meist nur eine Achse und eine Stütze. Die Anhängelasten können bei Flurförderzeugen bis zu 30 kN betragen. Die Fahrgeschwindigkeit liegt in der Größenordnung von 3 m/s. Elektrisch angetriebene Schlepper können auf vorgegebenen Fahrtrouten im innerbetrieblichen Transport ohne Fahrer eingesetzt werden. Die Steuerung erfolgt dann durch elektromagnetische Felder, die von im Boden verlegten Drähten bei Stromdurchfluß erzeugt werden. Diese wird als *Leitliniensteuerung* bezeichnet und kann vollständig automatisiert werden. Auch Kreuzungen und Weichen können in die Fahrtrouten eingebaut werden.

10.8.2. Wagen

Wagen sind Flurförderzeuge zum Transport von Lasten mit wenigstens einer Achse und einem belasteten Rad. Sie können ohne oder mit einer Hubeinrichtung ausgerüstet werden. Bei Wagen ohne Hubeinrichtung unterscheidet man solche mit einer ebenen Ladefläche, wie *Stirnwand-*, *Mehrzweck-* und *Elektrostandwagen*, der auch als *Elektrokarren* bekannt ist, und solche mit einem kippbaren Behälter. Die Wagen mit einer Hubeinrichtung haben ein um ≈ 200 mm in der Höhe verstellbares Lastaufnahmemittel, welches das Be- und Entladen erheblich erleichtert. Der *Niederhubwagen* besitzt als Lastaufnahmemittel eine ebene Platte, mit der z. B. Ladepritschen unterfahren, aufgenommen und befördert werden können. Der *Gabelhubwagen* hat ein gabelförmiges Lastaufnahmemittel, mit dem Paletten und Stapelbehälter unterfahren, angehoben und befördert werden können. Der *Portalhubwagen* fährt über die zu befördernden Lasten, nimmt diese innerhalb der Stützräder und des Portals auf und transportiert sie auch in dieser Lage (Tafel 40). Portalhubwagen sind meist mit Luftreifen ausgestattet und auch auf öffentlichen Straßen einsetzbar. Sie sind vor allem in der Forstwirtschaft, in Stahl- und Walzwerken, auf Containerlagerplätzen und ähnlichen Einsatzfällen anzutreffen. Sie werden für Tragkräfte bis zu 300 kN hergestellt und erreichen Fahrgeschwindigkeiten bis zu 40 km/h.

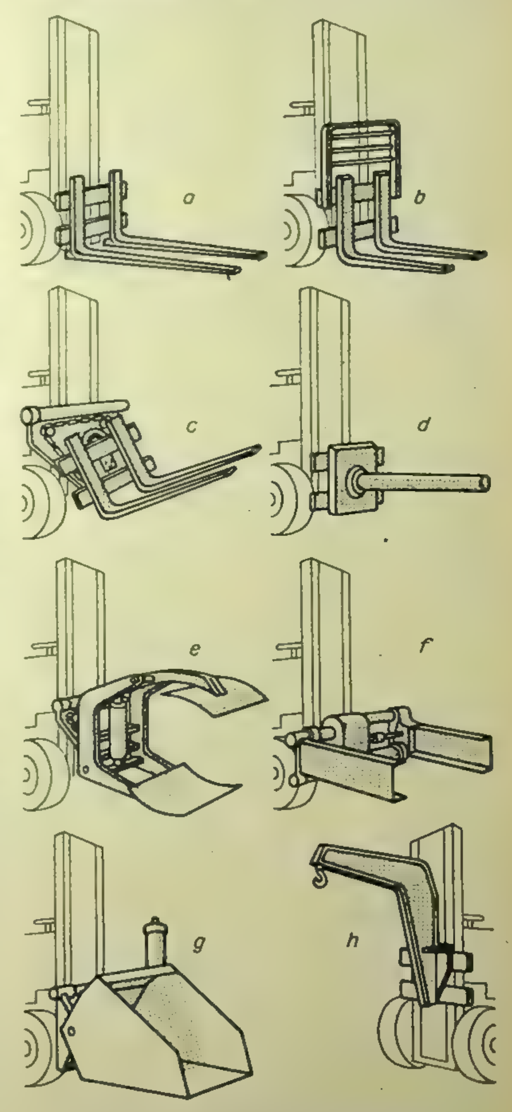


Abb. 10.8.3-1 Gabelstapler-Anbaugeräte: a Gabelverlängerung, b Schutzgitter, c Drehgabel, d Dorn, e Greifer mit Dreheinrichtung, f hydraulische Klammer, g hydraulische Schaufel, h Kranarm

10.8.3. Stapler

Stapler sind Flurförderzeuge mit einem senkrecht bewegten Lastaufnahmemittel. Sie werden vorzugsweise für das Auf- und Übereinandersetzen von Stückgütern, Paletten und Behältern verwendet. Erst in zweiter Linie sind sie Fördermittel. Deshalb sollen auch die Transportentfernungen 200 m nicht überschreiten. Die Stapelhöhen betragen bis zu ≈ 5 m. Der *Hochhubwagen* und der *Gabelhochhubwagen* haben zur Lastaufnahme eine Plattform bzw. Gabeln. Die Last wird durch die Räder unterstützt. Der *Spreizenstapler* nimmt die Lasten zwischen den Rädern auf. Der bekannteste und am weitesten verbreitete Stapler ist der *Gabelstapler*. Er wird mit einem Elektro- oder Verbrennungsmotor angetrieben. An der Stirnseite trägt er das Hubgerüst. Am Hubgerüst wird der Hubwagen, an dem die Lastaufnahmemittel (Abb. 10.8.3-1) befestigt werden, auf- und abbewegt. Der Hubwagen ist an einer Stahlgelenkkette befestigt, die mit Hilfe eines Hydraulikzylinders bewegt wird. Zum Aufnehmen und zum Absetzen der Last kann das Hubgerüst um max. 3° nach vorn geneigt werden. Während des Transports wird es um ≈ 10° nach hinten gekippt, um das Abgleiten von Lasten beim Bremsen zu verhindern. Für große Hubhöhen sind die Hubgerüste teleskopartig ausfahrbar. Wird das Hubgerüst quer zur Fahrtrichtung angeordnet, dann wird dieser Gabelstapler als *Seiten-* oder *Quergabelstapler* bezeichnet. Der *Schubstapler* nimmt Last außerhalb der Räder auf, was durch Verschieben der Lastaufnahmemittel oder des ganzen Hubgerüsts erreicht wird. Die Beförderung der Last erfolgt jedoch durch das Einziehen innerhalb der Räder. Vom *Schwenkstapler* wird die Last ebenfalls außerhalb der Radbasis aufgenommen und nach Schwenken des Hubgerüsts oder des Lastaufnahmemittels um eine vertikale Achse innerhalb der Radbasis transportiert. Gabelstapler werden für Tragkräfte bis zu 100 kN, vereinzelt auch darüber produziert.

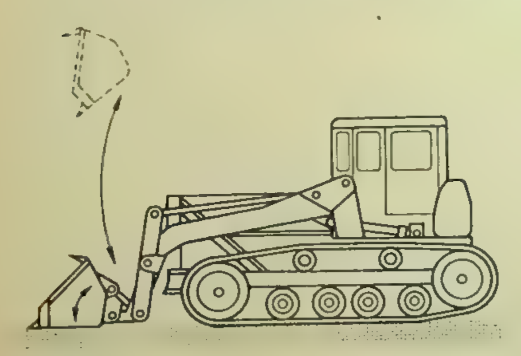


Abb. 10.9.2-1 Frontlader

10.8.4. Sonstige Flurförderzeuge

Unter den sonstigen Flurförderzeugen werden solche ohne Fahrantrieb zusammengefaßt. Die einfachsten Flurförderzeuge sind die *Karren*. Die *Schubkarre*, mit fester oder auch kippbarer Mulde, wird mit einem oder 2 Rädern hergestellt. Die Tragkraft beträgt bis zu 500 N. Die *Stechkarre* mit 2 Rädern vor, neben oder hinter den Holmen wird ebenfalls für den Handtransport von Säcken, Kisten u. a. Stückgütern benutzt.

10.9. Lademaschinen

Lademaschinen sind ortsveränderliche Maschinen, die das Fördergut — Schüttgut der unterschiedlichsten Kornform, -größe und Festigkeit — selbständig aufnehmen und auch über eine geringe Entfernung transportieren können. Ihre Hauptaufgabe ist das Aufnehmen und Verladen. In Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen wurde eine Vielzahl derartiger Maschinen entwickelt. Sie sind vor allem für die Mechanisierung und Rationalisierung geeignet, wobei der Durchsatz in der Regel in der Größenordnung bis zu 100 m^3/h liegt. Sie werden zum Be- und Entladen von Straßen- und Schienenfahrzeugen, zum Schüttgutumschlag, beim Erd- und Straßenbau, in der Landwirtschaft und im untertägigen Bergbau eingesetzt. Sie können stetig oder unstetig arbeiten. Vorherrschend sind Luftreifenfahrwerke, aber auch Schienen- und Raupenfahrwerke werden, wenn es die Einsatzbedingungen erfordern, angewendet. Der Durchsatz von 250 m^3/h wird nur von schweren Ladern und Kleinstschaufelradbaggern überboten (vgl. 10.4.1.). Die Art des Antriebs wird nach den Einsatzbedingungen ausgewählt. Für Lader im untertägigen Bergbau, wo die Strecken nur geringe Abmessungen aufweisen, herrscht der elektrische und Druckluftantrieb vor, da die Luftverunreinigung durch Abgase vermieden werden muß. Für Lader, die über Tage eingesetzt werden, wird bei den stetig arbeitenden Ladern der elektrische Antrieb, bei den unstetig arbeitenden der Antrieb mit Verbrennungsmotor bevorzugt. Dieselmotoren für die schweren Lader haben Antriebsleistungen bis zu 420 kW.

10.9.1. Stetig arbeitende Lademaschinen

Stetig arbeitende Lademaschinen nehmen das Schüttgut kontinuierlich mit den Arbeitsorganen auf und übergeben es zum Transport meist einem Gurtband-, seltener einem Gliederband- oder Stegkettenförderer. Die Benennung der Lademaschinen erfolgt nach der konstruktiven Gestaltung der Arbeitsorgane. Beim *Schneckenlader* nehmen 2 parallel nebeneinanderliegende, gegenläufige Förderschnecken das Gut auf. Beim *Frässcheibenlader*

sind es 2 nebeneinanderliegende, gegenläufige, flache, gezahnte und geriffelte Scheiben, die das Gut aufnehmen. Es wird durch rotierende Trommeln von den Scheiben abgestrichen und auf die nachfolgenden Stetigförderer übergeben. Beim *Becherwerkslader* wird das Fördergut von einem kurzen Becherwerk aufgenommen. Der *Hummerscherenlader* nimmt mit 2 durch rotierende Scheiben angetriebenen Armen das Gut auf. Weitere Arbeitsorgane von stetig arbeitenden Ladern sind *Stoßschaufel, Entenschnabel, Kugelschaufel* und *Schaufelrad*.

10.9.2. Unstetig arbeitende Lademaschinen

Unstetig arbeitende Lademaschinen haben zur Aufnahme des Schüttguts Greifer, Löffel oder Schaufeln. Der *Frontlader* (Abb. 10.9.2-1) hat eine kipp- und hebbare Schaufel. Er fährt frontal mit der Schaufel an das aufzunehmende Gut heran und stößt dabei die Schaufel hinein. Dann wird sie angekippt und angehoben. Der Lader fährt nun zur Entladestelle, wo die Schaufel durch Abkippen entleert wird. Danach kann ein neues Arbeitsspiel beginnen. Der *Überkopflader* nimmt das Gut ebenfalls vorn auf, bewegt aber dann die Schaufel über die Maschine hinweg und kann sie so hinter sich entleeren. Er kann sehr niedrig gebaut werden und wird dann im untertägigen Bergbau auf Schienen fahrend eingesetzt. Der *Wurfschaufellader* arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie der Überkopflader, wirft aber das in der Schaufel befindliche Gut nach hinten ab. Der *Schwenkschaufellader* (Abb. 10.9.2-2) kann den Ausleger, an dem sich die Schaufel befindet, zusätzlich zur Hub- und Kippbewegung noch drehen. Dadurch können Manövrierbewegungen des gesamten Geräts mit dem Fahrwerk weitgehend entfallen. Weitere Arbeitsorgane der unstetig arbeitenden Lademaschinen sind *Zughaken, Schrapper* und *Greifer*.

10.10. Kipper

Kipper sind Mechanismen zum schnellen Entladen von Eisenbahnwaggons, Förderwagen im Bergbau, die auch als Hunde bezeichnet werden, sowie von straßenfahrbaren Wagen, wie LKW-Anhängern oder Flurförderzeugen. Sie werden eingesetzt, wenn die Wagen keine selbständigen Entladeeinrichtungen, wie Sattelboden und aufklappbare Seitenwände oder kippbare Kästen, besitzen und der erforderliche Durchsatz mit Hilfe von Greifern bei der Entladung nicht zu erreichen ist. Die zu entladenden Wagen werden auf eine Plattform bewegt und verriegelt. Zum Anheben der Plattform dienen Seilwinden oder Hydraulikzylinder. Die Kipper sind in der Regel nur in Verbindung mit einem Bunker anzuwenden, der unter oder neben dem Kipper angeord-

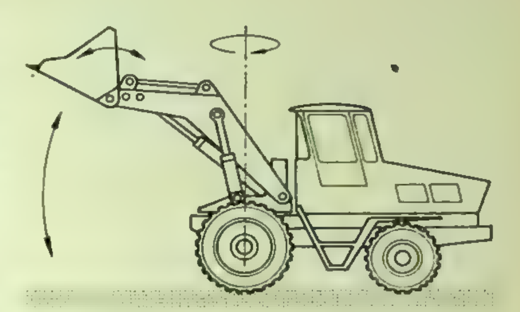


Abb. 10.9.2-2 Schwenkschaufellader

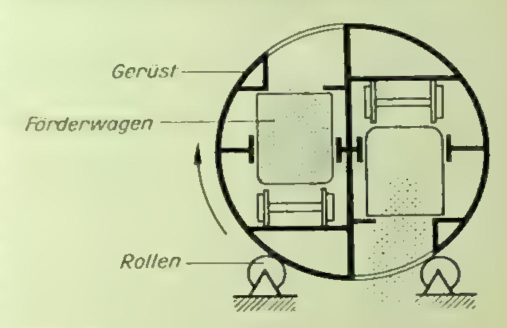


Abb. 10.10.0-1 Doppelkreiselkipper

net wird. Beim *Stirnkipper* (vgl. Abb. 16.1.7-3) wird die Plattform meist nur einseitig bis zu einer Neigung von 45 bis 60° angehoben (Tafel 39). Das Schüttgut kann dann über die aufklappbare Stirnwand des Wagens in den darunter liegenden Bunker fließen. Probleme entstehen bei der Entladung, wenn das Gut in den Wagen angefroren oder klebrig ist. Für die Entladung von Eisenbahnwaggons hat sich der Stirnkipper durchgesetzt. Er ist wirtschaftlich, wenn die zu entladende Masse 300 t in einer Stunde überschreitet. Die reine Kippzeit liegt bei 2 bis 5 min je Waggon. Für das Auffahren und Arretieren wird nochmals etwa die gleiche Zeit benötigt, so daß in einer Stunde 6 bis 10 Waggons entladen werden können. Beim *Seitenkipper* muß der Wagen etwas angehoben werden. Das kann getrennt oder gleichzeitig mit dem Kippen erfolgen. Sie haben sich bei der Entladung von LKW-Anhängern bewährt. Beim *Kreiselkipper* werden die Wagen auf eine Plattform gefahren, die sich innerhalb eines um seine Längsachse drehbaren Gerüsts befindet (Tafel 39). Die Wagen müssen in allen 3 Ebenen arretiert werden. Dann kann das Gerüst um 180° gedreht werden, wobei sich die Wagen entleeren. Der *Doppelkreiselkipper* (Abb. 10.10.0-1) kann 2 Wagen nebeneinander aufnehmen. Je nach der Konstruktion des Kreiselkippers können ein oder mehrere Wagen im Kipper gleichzeitig geleert werden.

11. Elektrotechnik

Die sehr rasche Entwicklung der Elektrotechnik und ihr Eindringen in alle anderen technischen Bereiche sind darauf zurückzuführen, daß
– sich die elektrische Energie mit verhältnismäßig geringen Verlusten über große Entfernungen transportieren läßt und ihre Umwandlung in andere Energieformen jederzeit möglich und leicht steuerbar ist;
– die Informationsgewinnung, -verarbeitung und -übertragung – auch über große Entfernungen – mit elektronischen Verfahren und Geräten vielseitig, verlustarm und sicher ist.

Der Begriff *Elektrotechnik* wird im engeren Sinne vor allem für die Grundlagenprobleme und alle energieumsetzenden Prozesse angewendet. Die *Elektronik* ist ein Teilgebiet der Elektrotechnik, das weitgehende Eigenständigkeit erlangt hat.

An die *Elektroenergieerzeugung* (vgl. 2.1.) schließen sich Übertragung und Verteilung – insgesamt als *Elektrizitätsversorgung* bezeichnet – an. Die hierzu notwendigen elektrischen Energieanlagen werden vom Kraftwerks- und Energiebau und vom Starkstromanlagenbau projektiert und errichtet. Die physikalisch-technischen Grundlagen werden in der *elektrischen Energietechnik* und in der *Hochspannungsmeß- und -prüftechnik* untersucht.

Bei der Umwandlung elektrischer Energie in mechanische, Wärme und Lichtenergie haben sich vor allem mit der Entwicklung der Automatisierungstechnik die Gebietsbezeichnungen gewandelt. Die *Leistungselektronik* verwendet *leistungselektronische Stellglieder* zum Steuern und Umformen der Leistung in der *elektrischen Antriebstechnik*, bei der Stromversorgung elektromagnetischer Energieumwandler des *Elektromaschinenbaus*, von Anlagen und Geräten der *Elektrochemie*, der *Elektrowärme*, der *Kühltechnik* und der *Beleuchtungstechnik*.

Die *elektrische Meßtechnik* umfaßt Meßgeräte und -verfahren für elektrische und nichtelektrische Größen und dient zur Informationsgewinnung als wesentliche Voraussetzung für Steuerung und Regelung in der Automatisierungstechnik.

Die *Informationstechnik* (vgl. 11.4.) liefert mit elektronischen Bauelementen und Verfahren die Grundlagen für digitale und analoge Datenverarbeitungsanlagen. Zur Informationstechnik gehört auch die *Nachrichtentechnik* zur drahtgebundenen und drahtlosen Übertragung von Signalen, in die mit Hilfe der *Elektroakustik* auch Schallwellen umgewandelt werden können (Hörfunk-, Fernsehtechnik u. a.).

11.1. Grundlagen der Elektrotechnik

Elektrische Vorgänge sind mit der Ansammlung oder Bewegung von Ladungsträgern, meist Elektronen mit negativer Ladung, seltener Ionen mit positiver oder negativer Ladung, d. h. Atomen oder Atomgruppen mit einem Überschuß (negative *Anionen*) oder Mangel (positive *Kationen*) an Elektronen, verbunden. Die Menge der Ladungsträger wird als *Elektrizitätsmenge* q bezeichnet. Im allgemeinen ist die Anzahl der positiven und negativen Ladungsträger gleich und in diesem neutralen Zustand keine elektrische Erscheinung vorhanden.

11.1.1. Leiter – Halbleiter – Nichtleiter

Leiter sind Stoffe mit zahlreichen, quasifrei beweglichen Ladungsträgern. *Feste Leiter* oder Elektronenleiter sind Metalle mit freien Elektronen. Als Leiterwerkstoffe werden vor allem Kupfer und Aluminium, für Sonderfälle auch Gold, Silber, z. B. für Kontaktstücke, oder Eisen und seine Legierungen, z. B. für Widerstände, eingesetzt. Flüssigkeitsleiter oder *Elektrolyte*, z. B. Salzlösungen, sind Ionenleiter. Gasförmige Leiter finden sich vorwiegend unter ionisierten Edelgasen.

Nichtleiter oder *Isolierstoffe* sind Materialien ohne bzw. mit extrem wenigen quasifreien Ladungsträgern, z. B. Vakuum, Gase, Luft, Öle, Glimmer, Porzellan, Glas, Plaste, Gummi, Faserstoffe. Isolierstoffe können bei sehr hohen elektrischen Feldstärken, z. B. beim Blitz, bei hoher Temperatur, z. B. im Lichtbogen, oder durch ionisierende Strahlung zu Leitern werden.

Halbleiter sind Stoffe, deren Leitfähigkeit i. allg. geringer als bei Leitern ist, aber oft stark von der Temperatur, vom Einwirken magnetischer und elektrischer Felder u. a. äußerer Einflüsse sowie vor allem von der Stromrichtung an den Übergängen abhängt. Bei den in der Elektrotechnik angewendeten Halbleitern sind die Atome einem Raumgitter zugeordnet. Bei den *Eigenhalbleitern* werden alle Elektronen der äußeren Schale des störungsfreien Kristallgitters durch Valenzbindung festgehalten. Bei Erwärmung, d. h. Vergrößerung der Schwingungen des Kristallgitters, werden die Elektronen teilweise frei, und im Gitter entstehen freie Stellen, die Löcher bzw. *Defektelektronen*. Wird an Eigenhalbleitern eine Spannung angelegt, so wandern die Elektronen zum positiven, die Defektelektronen – sie verhalten sich wie positive Ladungen – zur negativen Elektrode. Mit zunehmender Temperatur werden immer mehr Elektronen frei, und die Leitfähigkeit nimmt zu. Diese Eigenschaft wird bei *Heißleitern* oder *Thermistoren* ausgenutzt, die aus gesintertem Magnesium- oder Titanoxid bestehen (vgl. 11.5.1.). Bei den *Störstellenhalbleitern* wird durch Zufügen (Dotieren) von Fremdatomen die Leitfähigkeit verändert. Die in der 4. Gruppe des Periodensystems der Elemente stehenden Halbleiter Germanium (Ge) und Silizium (Si) haben 4 Elektronen in der äußeren Schale des Atoms. Man fügt ihnen Atome von Elementen der 5. oder 3. Gruppe des Periodensystems zu. Gibt man z. B. Antimon (Sb) hinzu, so werden im Germaniumkristall nur 4 bis 5 Elektronen der äußeren Schale des Antimonkristalls zur Valenzbindung gebraucht; das 5. Elektron ist also frei. Solche Halbleiterelemente, die Elektronenüberschuß haben, nennt man *Donatoren*, z. B. *n*-Germanium (negativ leitend). Bei Hinzufügen eines Atoms der 3. Gruppe des Periodensystems, z. B. Indium, fehlt ein Elektron und muß zur Valenzbindung einem benachbarten Germaniumatom entnommen werden. Solche Halbleiterelemente, die Elektronen aufnehmen, heißen *Akzeptoren*, z. B. *p*-Germanium (positiv leitend). Die Beimengung von Fremdkörpern ist aber außerordentlich gering, ≈ 1 Fremdatom auf 10^8 (Germanium-) Atome. Ergibt sich zwischen einem *p*- und *n*-Germanium eine Berührungsfläche, eine Grenzschicht, so werden hier entgegengesetzte Ladungen ausgetauscht, bis ein Gleichgewichtszustand entsteht und damit ein *pn*-Übergang gebildet wird.

11.1.2. Elektrische und magnetische Grundgesetze

Elektrischer Strom ist die Bewegung der Ladungsträger, d. h. die Änderung der Elektrizitätsmenge in der Zeit t. Seine Größe, die *Stromstärke*, ist $I = Q/t$, bzw. bei sich ändernden Vorgängen $i = dq/dt$, gemessen in Ampere (A). Der elektrische Strom ruft ein ihn umgebendes Magnetfeld, im Elektrolyten bei der Elektrolyse Materialtransport und Wärme hervor. Die *Stromdichte* $S = Q/A$ in einem Querschnitt A, gemessen in A/mm², ist für die Erwärmung der Leiter verantwortlich und bestimmt deshalb den zu wählenden Querschnitt.

Spannung. Zur Bewegung der Ladungsträger im *Stromkreis*, dem in sich geschlossenen Weg des Stroms, muß von einer Spannungsquelle Energie zugeführt werden. Dies führt zur *Umlaufspannung* U_0 oder *Urspannung* E, aus historischen Gründen auch *Elektromotorische Kraft* (EMK) genannt. An Verbrauchern, in denen elektrische Energie in Wärme, mechanische Energie, Lichtenergie oder chemische Energie umgewandelt wird, tritt ein Spannungsabfall U auf. Die Spannung E bzw. U wird in Volt (V) gemessen. Die Bewegung der Ladungsträger beträgt z. B. in Metallen nur 0,5 mm/s; die Anschauung zeigt aber, daß in jedem praktisch beliebig großen Stromkreis die elektrischen Vorgänge beim Einschalten an jeder Stelle gleichzeitig einsetzen. Dies wird durch das *elektrische Feld* hervorgerufen, so daß die elektrischen Vorgänge mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen von $\approx 3 \cdot 10^5$ km/s ablaufen.

Ohmscher Widerstand $R = U/I$, gemessen in Ohm (Ω), ist von den Leiterabmessungen abhängig, $R = \varrho\, l/A$ (ϱ = spezifischer Widerstand, l = Länge des Leiters, A = Querschnittsfläche des Leiters). $R = U/I$ = konst. ist das Ohmsche Gesetz.

Magnetfeld. Jeder elektrische Strom bzw. jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben, das durch Feldlinien veranschaulicht wird. Die Festlegung der Feldrichtung und des Nord- und Südpols in bezug auf die Stromstärke zeigt Abb. 11.1.2-1. Die Dichte des Felds, die *Flußdichte* oder *magnetische Induktion B*, gemessen in Tesla (T), erhöht sich bis auf das 10^5fache, wenn ein ferromagnetisches Material in das Feld gebracht wird. Aus diesem Grund

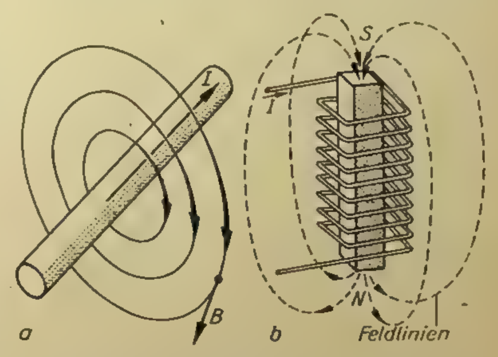


Abb. 11.1.2-1 a stromdurchflossener Leiter, b stromdurchflossene Spule mit Magnetfeld (B = magnetische Induktion)

wird der *magnetische Kreis*, der Weg der Feldlinien in Geräten und Maschinen, so weit wie möglich aus einem ferromagnetischen Werkstoff, vor allem aus Eisen, hergestellt. Mit der magnetischen Feldstärke H, gemessen in A/m, gilt $B = \mu H$, wobei die *Permeabilität* μ die Materialeigenschaften wiedergibt.

Hartmagnetische Werkstoffe halten ein ihnen aufgeprägtes Magnetfeld im Gegensatz zu weichmagnetischen längere Zeit konstant und werden deshalb auch als *Permanentmagnete* bezeichnet. Natürlicher Magneteisenstein (Fe_2O_3) und kohlenstoffarmer Stahl wurden inzwischen durch Werkstoffe mit sehr hoher Koerzitivfeldstärke, wie z. B. AlNiCo, Maniperm, Bariumferrit, ersetzt. Da weichmagnetische Werkstoffe geringere Energieverluste (*Hystereseverluste*) aufweisen, werden sie bei Wechselfeldern angewendet, z. B. als Dynamobleche. Dauermagnete werden in Geräten kleinerer Leistung, Elektromagnete bzw. elektromagnetische Erregung bei höheren Leistungen eingesetzt. Den *magnetischen Fluß* Φ, gemessen in Vs, erhält man durch Summation aller Induktionswerte in einer Fläche, z. B. einer Windung.

Kraftgesetz. Bringt man ein ferromagnetisches Teil in ein Magnetfeld, so erfährt es eine Kraft $F \sim \Phi^2$ (Abb. 11.1.2-2). Aber auch auf jeden stromdurchflossenen Leiter (bzw. jeden Strom) wirkt im Magnetfeld eine Kraft $F = IBl$ mit l als vom Strom durchflossene Leiterlänge im Magnetfeld (Leiter steht senkrecht zum Magnetfeld). Die Kraftrichtung kann mit Hilfe der Rechte-Hand-Regel für Ursache (U), Vermittlung (V) und Wirkung (W) (UVW-Regel) ermittelt werden (Abb. 11.1.2-3). Die Kraft läßt sich auch zur Erzeugung von Drehbewegungen ausnutzen, z. B. im Elektromotor.

Spannungsinduktion. Ändert sich der magnetische Fluß Φ einer Leiterschleife, z. B. der Windung einer Spule, in einem differentiell kleinen Zeitabschnitt dt um dΦ, so entsteht eine Urspannung (EMK) e, die durch das *Faradaysche Induktionsgesetz* $e = -w(\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t)$ mit der

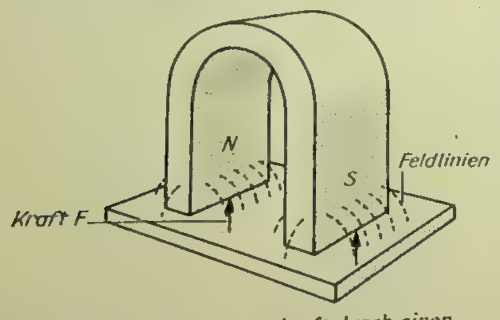


Abb. 11.1.2-2 Anziehungskraft durch einen Dauermagnet

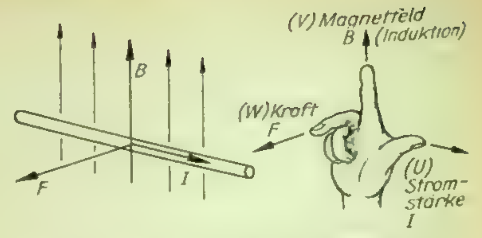


Abb. 11.1.2-3 Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter und Anwendung der Dreifingerregel (Rechte-Hand-Regel)

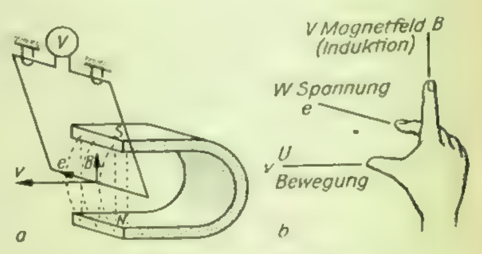


Abb. 11.1.2-4 a Spannungsinduktion in pendelnd aufgehängter Leiterschleife, b Anwendung der Dreifingerregel (Rechte-Hand-Regel)

Windungszahl w berechnet und an den Enden der Leiterschleife bzw. Spule mit einem Spannungsmesser (V) gemessen werden kann. Das Minuszeichen ist aufgrund einer festgelegten Zuordnung zwischen elektrischen und magnetischen Größen einzufügen. Die Richtung der induzierten Spannung kann bei Translationsbewegung, z. B. einer schaukelnd aufgehängten Spule, und Drehbewegung ebenfalls mit Hilfe der Rechte-Hand-Regel (UVW-Regel) bestimmt werden (Abb. 11.1.2-4), wobei das Induktionsgesetz günstiger als $e = vBl$ (v = Geschwindigkeit des Leiters) geschrieben wird. Die Spannungsinduktion wird sehr häufig genutzt, z. B. im Generator, Transformator, Fernhörer, Mikrofon, Magnettongerät.

Außer in den Wicklungen werden auch in anderen Teilen Spannungen (e_w) induziert und können, falls die Teile elektrisch leitend sind, Ströme antreiben. Diese fließen auf geschlossenen, wirbelartig das Magnetfeld umgebenden Wegen — deshalb *Wirbelströme* (i_w) —, rufen eine Erwärmung und damit *Wirbelstromverluste* hervor. Da diese unerwünscht sind, werden die Eisenteile von Geräten bei geringer Frequenz aus gegeneinander isolierten Blechen zusammengesetzt (Lamellierung) und bei höheren Frequenzen als *Massekerne* aus feingepulvertem, mit einem isolierenden Bindemittel zusammengepreßten Eisen oder als *Ferritkerne*, einer Sinterverbindung von Eisen(III)-oxid mit anderen Oxiden, wie z. B. NiO, MnO, ZnO, ausgeführt. Technisch werden Wirbelströme zum Schmelzen oder Härten, z. B.

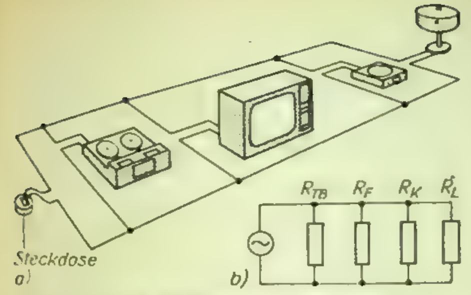


Abb. 11.1.3-1 a *Haushaltsstromkreis und* b *Schaltbild*

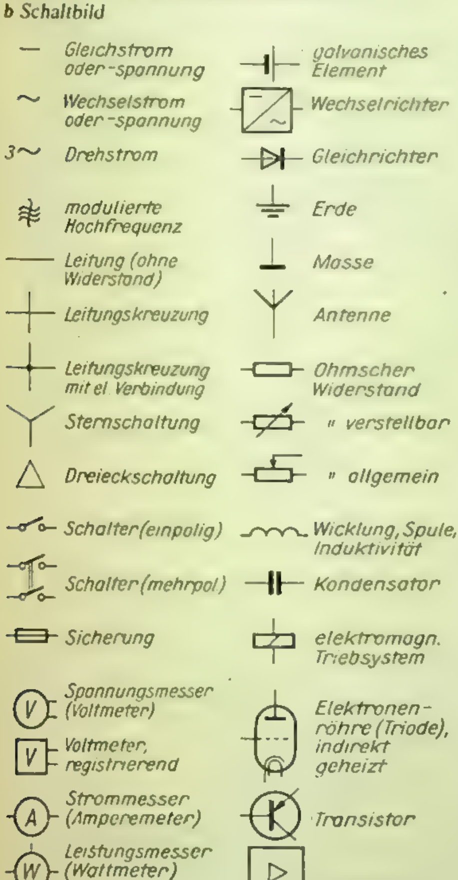


Abb. 11.1.3-2 Schaltzeichen und Symbole der Elektrotechnik/Elektronik

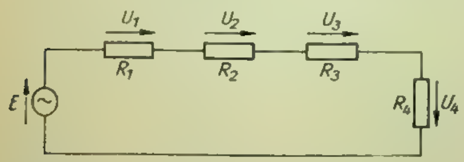


Abb. 11.1.3-3 *Reihenschaltung von Verbrauchern*

in Induktionsöfen, zum Bremsen (*Wirbelstrombremse*), z. B. in elektrischen Bahnen, sowie zum Dämpfen des Zeigerausschlags bei Meßgeräten (Wirbelstromdämpfung) genutzt.

11.1.3. Stromkreise und Schaltbilder

Zur Vereinfachung werden die Stromkreise als *Schaltbild* mit symbolischer Darstellung der Geräte (Abb. 11.1.3-1) und Verbindungen durch *Schaltzeichen* angegeben (Abb. 11.1.3-2). Wegen der *Parallelschaltung* aller Verbraucher ist die Spannung $U = E$ an allen gleich groß und der Gesamtstrom wird $i = i_l + i_T + i_F + i_K$. Allgemein gilt an einem *Knotenpunkt*, einer Verzweigungsstelle im Stromkreis, für die zu- und abfließenden Ströme

$\sum i_{zu} = \sum i_{ab}$ 1. Kirchhoffsches Gesetz (Knotenpunktsatz).

Bei Reihenschaltung der Verbraucher gilt (Abb. 11.1.3-3)

$e = u_1 + u_2 + u_3 + u_4$ oder allgemein

$\sum e = \sum u$ 2. Kirchhoffsches Gesetz (Maschensatz).

Zu beachten ist, daß alle Verbindungen im Schaltbild widerstandslos sind. Widerstände von Leitungen also durch Widerstände im Schaltbild dargestellt werden müssen.
Umfangreiche Schaltbilder werden nach Einsatzgebiet oder Funktion, z. B. als Schalt-, Installations-, Stromlaufplan, bezeichnet. Faßt man alle Verbraucher (Geräte) eines Stromkreises in einem Widerstand R_V und ebenso alle zu einer Speiseeinrichtung gehörenden Widerstände, wie z. B. die Leitungs-, Generator- und Transformatorwiderstände der Energieversorgung und bei der Endstufe elektronischer Geräte die Leitungs-, Vorschalt- und Endverstärkerwiderstände, zu einem Innenwiderstand R_i zusammen, so entsteht der *Grundstromkreis* (Abb. 11.1.3-4), auf den sich alle Stromkreise zurückführen lassen. Bei der *Energieversorgung* fordert man weitgehend konstante Spannung U bei veränderlichem Strom I. Bei $U = E - IR$ erfordert dies sehr kleine Werte für R_i. Als Grenzen der Belastungsfälle erhält man bei $I = 0$ (sehr großem R_V) *Leerlauf* und bei $R_V = 0$ *Kurzschluß*. Der Kurzschlußstrom nimmt wegen $I_K = E/R_i$ sehr hohe Werte an.

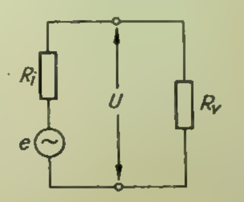


Abb. 11.1.3-4 *Grundstromkreis*

Bei elektronischen Geräten fordert man möglichst hohe Leistungsabgabe an den Verbraucher, die sich bei $R_i = R_V$ ergibt und durch Anpassungsglieder erreicht wird.

11.1.4. Wechsel- und Gleichstrom

Wechselgrößen. Bewegt man den in Abb. 11.1.4-1 betrachteten unteren Leiter zum Südpol hin, so ändert sich die Richtung der induzierten Spannung und an den auf den Schleifringen (R_1, R_2) schleifenden Kontakten (Bürsten B_1, B_2) kann eine Wechselspannung abgenommen werden. In der Technik kommen verschiedene Zeitverläufe der Wechselgrößen vor. In der Energietechnik werden vor allem *zeitlich sinusförmige Wechselgrößen* angewendet. Abb. 11.1.4-2 zeigt neben einer Wechselspannung u auch einen zeitlich um den *Phasenwinkel* φ verschobenen Wechselstrom i. Der Wert der Wechselgröße in jedem Augenblick wird als *Augenblickswert* (u, i), ihr Größtwert als *Maximalwert* ($\hat{u}$, $\hat{i}$) bezeichnet. Die Zeitspanne T, nach der sich der gleiche Verlauf wiederholt, nennt man *Periodendauer* und die Anzahl der in einer Sekunde durchlaufenen Perioden oder

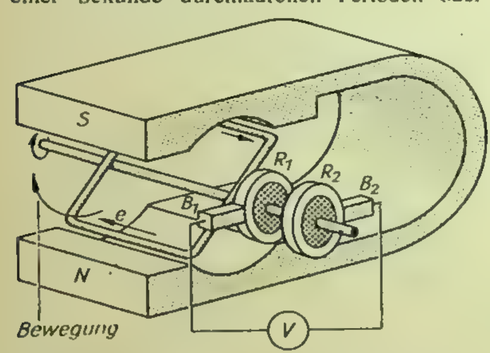


Abb. 11.1.4-1 *Schema eines Wechselstromgenerators*

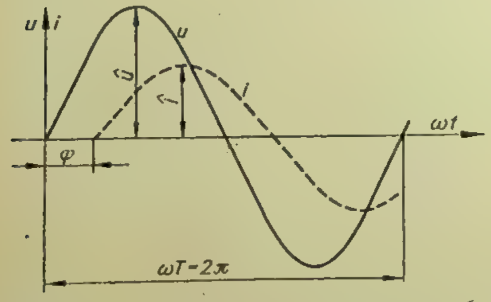


Abb. 11.1.4-2 *Wechselspannung und Wechselstrom*

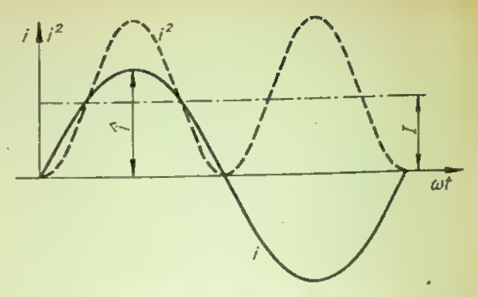


Abb. 11.1.4-3 *Effektivwert des Wechselstroms*

Schwingungen *Frequenz f*, gemessen in Hertz (Hz). Häufig wird die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ angegeben.

Gleichgrößen. Einen Strom I, dessen Größe und Richtung unverändert bleiben, nennt man *Gleichstrom*.

Mischgrößen. Einen Gleichstrom, dem ein merklicher Wechselstrom überlagert ist, bezeichnet man als *Mischstrom*.

Modulierte Größen. Überlagert man Wechselgrößen andere Wechselgrößen mit stark abweichender Frequenz, spricht man von modulierten Größen und je nach Überlagerung von Amplituden- oder Frequenzmodulation (vgl. 11.4.4.).

Effektivwert. In einem Ohmschen Widerstand wird nach dem *Jouleschen Gesetz* in der Zeit T die elektrische Energie $W = I^2 RT$ in Wärme umgesetzt, wenn ein Gleichstrom I fließt. Bei Wechselstrom ändert sich i und es müssen alle ($i^2 R \, \mathrm{d}T$)-Werte über der Zeit T bzw., da R konstant ist, nur die in Abb. 11.1.4-3 eingetragenen i^2-Werte summiert werden. Mit dem in der Abb. eingetragenen Mittel- bzw. Effektivwert $I = \hat{i}/\sqrt{2}$ erreicht man die gleiche Wärmewirkung, den gleichen Effekt, wie bei Gleichstrom. Alle in der Wechselstromtechnik angegebenen und auch von Meßgeräten angezeigten Werte sind – falls nicht besonders vermerkt – Effektivwerte (Tab. 11.1.4-4).

Widerstände bei Wechsel- und Gleichstrom. *Ohmscher Widerstand.* Der mit einer Erwärmung (*Wärmeverlust, Stromwärmeverlust*) verbundene Ohmsche Widerstand (Wirkwiderstand) ist in den ebenso bezeichneten Bauelementen bei

Tab. 11.1.4-4 *Beispiele für Spannungen und Stromstärken*

Spannungen		Stromstärken	
Gewitterwolke	15 MV	Blitz	bis 200 kA
Hochspannungsleitung	400 kV	Induktionsofen	100 kA
		Schweißen	bis 1 kA
Fernbahnen	15 kV	Straßenbahn	600 A
Straßenbahn	600 V	Kochplatte	5 A
Haushalt	220 V	Bügeleisen	2 A
Taschenlampe	4,5 V	Glühlampe (200 W)	1 A
Antennenspannung	5 μV	Kopfhörer	10 μA

Gleich- und Wechselstrom vorhanden. Mit Ohmschen Widerständen können bestimmte Strom- und Spannungswerte eingestellt werden. Für Drahtwiderstände verwendet man Kupfer-, Mangan-, Chrom-Nickel-, Chrom-Aluminium-Legierungen u. a. und Legierungen, deren Widerstand unabhängig von der Temperatur ist, z. B. Konstantan. *Schichtwiderstände* (vgl. 11.5.1.) weisen eine im Vakuum auf einen Träger niedergeschlagene Kohlenstoffschicht auf. Durch Einschleifen einer Wendel kann der Widerstandswert erhöht und abgeglichen werden. Neben den *Festwiderständen* gibt es veränderliche Widerstände, z. B. *Schiebewiderstände*. Sie können als Spannungsteiler (*Potentiometer*) dienen.

Induktiver Widerstand. Fließt Wechselstrom durch eine Leiterschleife oder Spule (vgl. Abb. 11.1.2-1), so wird eine Spannung entgegengesetzt zur angelegten Spannung induziert, die den Strom verzögert, so daß eine zeitliche Phasenverschiebung auftritt und der Strom der Spannung um den Winkel φ nacheilt (vgl. Abb. 11.1.4-2). Vernachlässigt man den Ohmschen Widerstand, so beträgt der Phasenwinkel 90° (vgl. Abb. 11.1.4-2) und man spricht von einem rein *induktiven Widerstand* (Blindwiderstand, Reaktanz) $R_L = \omega L$ mit der Induktivität $L = (w^2 \mu A)/l$, gemessen in Henry (H, mit 1 H = 1 Vs/A), die sich aus der Windungszahl w und der Länge l bzw. dem Querschnitt A des magnetischen Kreises berechnen läßt. Wicklungen elektrischer Maschinen und Geräte haben wegen des Eisenkreises und der hohen Windungszahl einen großen induktiven, aber auch einen beträchtlichen Ohmschen Widerstand. Spulen mit Eisenkern (vgl. 11.5.1.) werden in der Energieversorgung zur Strombegrenzung von Kurzschlüssen eingesetzt. Durch Verschieben des Kerns in einer Spule läßt sich leicht die gewünschte Induktivität einstellen.

Kapazitiver Widerstand. Wird an 2 durch einen Isolierstoff, das *Dielektrikum*, getrennte Metallplatten (Abb. 11.1.4-5) eine Gleichspannung U gelegt, so fließt ein von beiden Strommessern A angezeigter Strom so lange, bis auf beiden Platten die gleiche Elektrizitätsmenge Q bei entgegengesetzter Polarität vorhanden ist: $Q = CU$. Der Proportionalitätsfaktor C, die Kapazität, gemessen in Farad (F, mit 1 F = 1 As/V), ist der Fläche A der Platten und der Dielektrizitätskonstanten ε direkt, dem Abstand d der Platten aber umgekehrt proportional; $C = \varepsilon A/d$. Bei Wechselstrom werden die Platten im Rhythmus der Frequenz umgeladen. Die zeitliche Änderung der Elektrizitätsmenge, der *Ladestrom*, eilt bei rein kapazitivem Widerstand der Spannung um 90° voraus. Der *kapazitive Widerstand*, auch Blindwiderstand oder Kapazitanz genannt, ergibt sich zu $R_C = 1/(\omega C)$. Kapazitive Widerstände (Kondensatoren) werden als *Platten-* (vgl. Abb. 11.1.4-5) oder *Drehkondensatoren* (vgl. 11.5.1.), letztere mit einem festen (*Stator*) und einem drehbaren Plattensystem (*Rotor*), gegeneinander durch Luft (Luftkondensator) isoliert. Weitere Kondensatortypen vgl. 11.5.1.

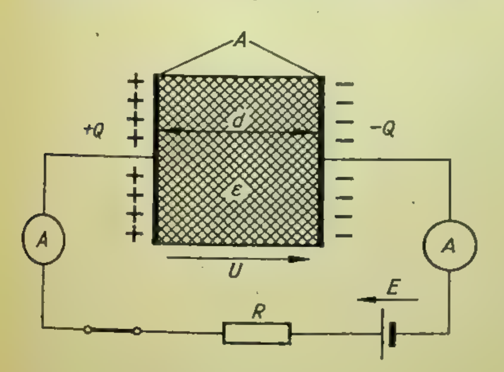


Abb. 11.1.4-5 Kondensator im Stromkreis

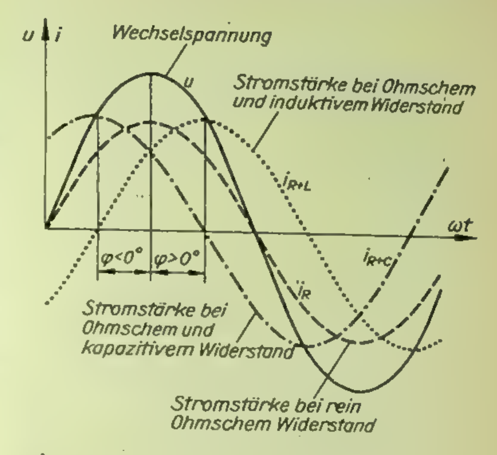


Abb. 11.1.4-6 Strom- und Spannungskurve bei verschiedenen Wechselstromwiderständen

Kapazitäten können auch zusammen mit Induktivitäten unerwünschte Schwingkreise in Hochspannungsnetzen bilden oder bei hoher Frequenz große kapazitive Ströme (Ableitströme) hervorrufen.

Zusammenschaltung von Wechselstromwiderständen. In Abb. 11.1.4-6 sind Spannung und Strom für $\varphi = 0$, also für rein Ohmschen Widerstand, für $\varphi > 0$, also für eine Kombination aus Ohmschen und induktiven Widerstand, und für $\varphi < 0$ aus Ohmschem und kapazitivem Widerstand angegeben. In technischen Stromkreisen treten die 3 Wechselstromwiderstände sowohl in Reihen- als auch in Parallelschaltung auf.

Drehstrom. In der Energieversorgung und -umwandlung wird sehr häufig das Drehstromsystem aus 3 zeitlich um 120° verschobenen Wechselspannungen (u_R, u_S, u_T) bzw. den entsprechenden Strömen zusammengesetzt (Drei-

phasenstrom, *Drehstrom*). Vorteile sind die Verkettung der 3 Phasen durch Stern- oder Dreieckschaltung, 2 wählbare Spannungen bei geringerer Leiterzahl als mit getrennten Wechselspannungsquellen und kleinere Maschinen durch ein magnetisches Drehfeld.

Da sich die Spannungen und Stromstärken eines in allen Strängen gleichen (symmetrischen) Drehstromsystems zu Null addieren, sind 2 Schaltungen möglich.

Bei *Sternschaltung*, z. B. der Wicklungen eines Drehstromerzeugers nach Abb. 11.1.4-7a, wird am gemeinsamen *Mittelpunkt* (*XYZ*, *Sternpunkt*) der *Mittelpunktleiter* (*Nulleiter N*) angeschlossen, so daß ein *Drehstrom-Vierleiter-System RSTN* entsteht. Stromverbraucher können entweder zwischen Nulleiter und einer Leitung (*R*, *S* oder *T*) oder zwischen den Leitern (*R-S*, *S-T*, *T-R*) angeschlossen werden. Die Phasen- oder *Strangspannung U* (*R-N*, *S-N*, *T-N*) ist kleiner als die Leiterspannung $U_L = \sqrt{3}\, U$ (z. B. 380/220 V). Für die Stromstärken gilt $I_L = I$. Der Nulleiter wird nur vom Strom I_0 durchflossen, wenn die Stränge ungleich (*unsymmetrisch*) belastet sind und die Stromstärken sich nicht zu Null addieren. Ohne Nulleiter erhält man ein Dreileitersystem (*RST*).

Bei *Dreieckschaltung* ist das Ende jeder Wicklung jeweils mit dem Anfang der folgenden verbunden. Bei dieser Schaltung (Abb. 11.1.4-7b) ist nur ein Dreileitersystem möglich: $U_L = U$ und $I_L = \sqrt{3}\, I$.

Leistungen bei Gleich-, Wechsel- und Drehstrom. Bei Gleichstrom ist die Leistung $P = UI$. Bei Wechselgrößen muß vom Produkt $p = ui$ ausgegangen werden. Abb. 11.1.4-8 zeigt z. B. für einen Wechselstromverbraucher mit dem Phasenwinkel φ, daß zeitweise negative Leistungswerte auftreten und der Mittelwert der Leistung, die *Wirkleistung* $P = UI\cos\varphi$, gemessen in Watt (W), der für die Energiewandlung zur Verfügung steht, kleiner als bei $\varphi = 0$ wird. $\cos\varphi$ nennt man *Leistungsfaktor*. Negative Leistungs-

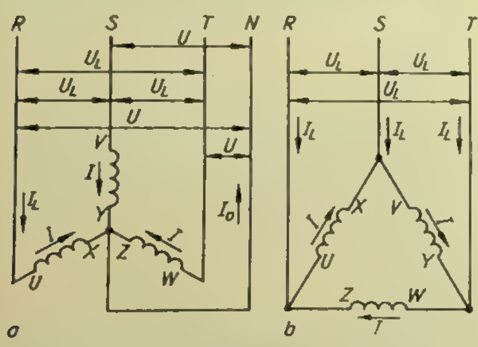


Abb. 11.1.4-7 a Sternschaltung, b Dreieckschaltung eines Drehstromerzeugers

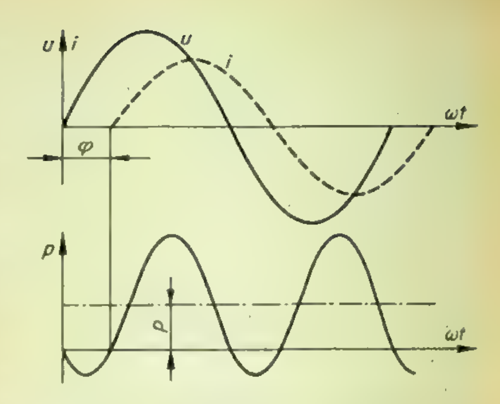


Abb. 11.1.4-8 Bestimmung der Wechselstromleistung

anteile bedeuten, daß der Leistungsfluß sich umkehrt und vom Verbraucher zum Erzeuger geht. Für einen Ohmschen Verbraucher (Ohmschen Widerstand) wird mit $\varphi = 0$ und $\cos\varphi = 1$ $P = UI$. Für Verbraucher mit rein induktivem oder rein kapazitivem Widerstand wird $\varphi = 90°$ und mit gleichen positiven und negativen Leistungsanteilen $P = 0$. In diesen Fällen tritt nur *Blindleistung* $Q = UI\sin\varphi$ auf. Die Scheinleistung $S = UI$, gemessen in VA, wird auf dem Leistungsschild von Generatoren und Transformatoren angegeben, da wegen der Verluste, die von Spannung und Stromstärke abhängen, eine bestimmte Scheinleistung nicht überschritten werden darf. Bei Motoren dagegen gibt man die mechanische Leistung P_m in Watt (W) an, damit der Käufer die Belastbarkeit des Motors sofort erkennen kann. Eine Ausnahme bilden Kleinstmotoren mit Angabe der aufgenommenen Leistung *P*. Die Leistung eines Drehstromerzeugers oder -verbrauchers setzt sich aus den 3 Strangleistungen zusammen.

Verbesserung des Leistungsfaktors. Da die Generatoren, Leitungen und Umspanner, d. h. die Geräte der Energieversorgungseinrichtungen, für die Scheinleistung *S* ausgelegt werden (s. o.), die Verbraucher aber nur die Wirkleistung zur Energieumsetzung ausnutzen, ist die beim Verbraucher zur Energieumwandlung zur Verfügung stehende Leistung um so größer, je höher der Leistungsfaktor wird. Die Hauptverbraucher, Transformatoren, Motoren, Schmelz- und Karbidöfen u. a., brauchen zum Aufbau eines Magnetfelds induktive Blindleistung. Diese muß in unmittelbarer Nähe der Verbraucher (*Einzelkompensation*) bzw. an der Einspeisestelle eines Industriewerks (*Gruppen-* oder *Zentralkompensation*) kompensiert werden, damit die Energieversorgungseinrichtungen nur Wirkleistungen zu übertragen brauchen. Der Leistungsfaktor ist abhängig vom Phasenwinkel φ. Zum Zwecke der *Phasenschiebung*, d. h. der Verkleinerung des Phasenwinkels und damit der Erhöhung des Leistungsfaktors, werden deshalb in der tech-

nischen Praxis Kondensatoren oder Kondensatorenbatterien (*ruhender Phasenschieber*) stufenweise von Hand oder durch eine Regeleinrichtung zugeschaltet. Gleiche Eigenschaften hat eine übererregte Synchronmaschine, die entweder im Leerlauf nur als *rotierender Phasenschieber* eingesetzt oder gleichzeitig mechanische Leistung an eine Arbeitsmaschine abgeben kann. Mit zunehmendem Erregerstrom erhöht sich bei dieser Maschine die kompensierende Blindleistung, so daß ein gewünschter Leistungsfaktor nahe $\cos\varphi = 1$ an der Anschlußstelle der Maschine im Netz, z. B. in großen Industriebetrieben, Hauptumspann- oder Kraftwerken, eingestellt werden kann.

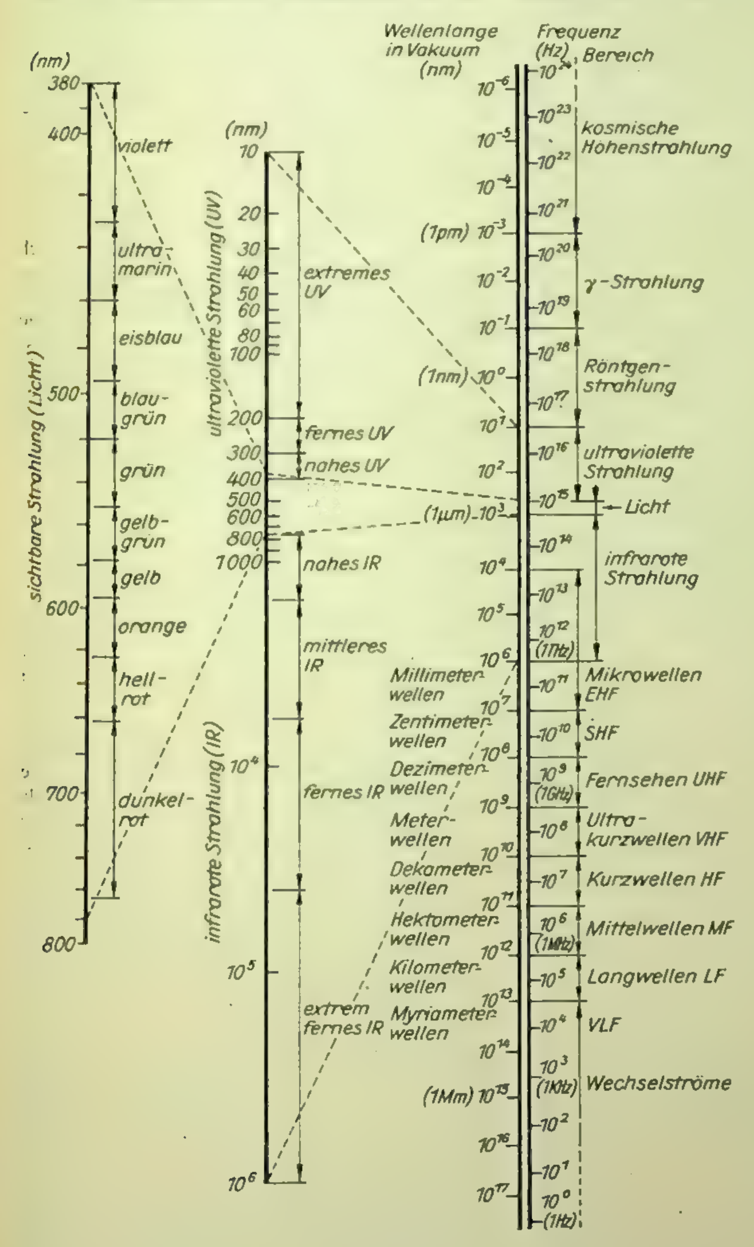


Abb. 11.1.5-1 Wellenlängen und zugehörige Frequenzen der elektromagnetischen Strahlung

11.1.5. Elektromagnetische Wellen

Im Jahre 1865 zeigte *J. C. Maxwell*, daß zwischen den elektrischen und den magnetischen Feldern (vgl. 11.1.2.) eine enge Beziehung besteht. Ein sich in seiner Stärke änderndes elektrisches Feld erzeugt ein sich änderndes magnetisches Feld und umgekehrt. Diese Erscheinung breitet sich als *elektromagnetische Welle* im Raum aus (im Vakuum mit der *Lichtgeschwindigkeit* $c = 299\,792$ km/s). Es zeigte sich, daß es elektromagnetische Wellen mit allen denkbaren Wellenlängen gibt, die mit der Frequenz dieser Wellen über die Beziehung $f\lambda = c$ verknüpft sind. Die Abb. 11.1.5-1 zeigt eine Übersicht über das Spektrum der elektromagnetischen Wellen, zu denen auch die *Funkwellen* mit Wellenlängen ab einigen Zentimetern zählen.
Kondensator und Spule können die im elektrischen Feld zwischen den Platten bzw. im magnetischen Feld um die Spulenwindungen gespeicherte Energie austauschen, da die Ströme um eine halbe Periode phasenverschoben sind. Im *Schwingkreis* (Abb. 11.1.5-2) kann deshalb die Energie zwischen Spule und Kondensator pendeln (schwingen), so daß elektromagnetische Schwingungen entstehen. Die Spannungsquelle deckt nur die Verluste, z. B. durch Ohmsche Widerstände. Mit steigender Frequenz genügen immer kleinere Plattenabmessungen des Kondensators und geringere Spulenwindungszahlen, um gleiche elektromagnetische Schwingungen zu erhalten. Bei Hochfrequenz reicht eine stabförmige Antenne aus, um die zugeführte hochfrequente Energie in Form von elektromagnetischen Wellen abzustrahlen bzw. zu empfangen (vgl. Tab. 11.4.4-2). Nach der Wellenausbreitung unterscheidet man Boden- und Raumwelle. Die *Bodenwelle* wird um so weniger gedämpft, je besser die Leitfähigkeit der Erdoberfläche (besonders gut bei Meerwasser) und je größer die Wellenlänge, d. h. je geringer die Frequenz, ist. Die Ausbreitung der in der Atmosphäre verlaufenden *Raumwelle* ist Schwankungen unterworfen, die von der Sonnenaktivität abhängen.



Abb. 11.1.5-2 Schwingkreis

Für Mittel- und Langwellen ist tagsüber nur Nahempfang durch die Bodenwelle möglich, da die Raumwelle durch eine – nachts verschwindende – Ionosphärenschicht absorbiert wird.
Kurzwellen werden oft mehrfach von der Ionosphäre zur Erde reflektiert und deshalb in sehr große Entfernung übertragen. Mit abnehmender Wellenlänge, vor allem im dm- und cm-Wellenbereich, breiten sich die Wellen ähnlich wie das Licht aus (quasioptisch). Daher ist UKW-Empfang hauptsächlich auf optische Sichtweite (≈ 100 km) beschränkt, wenn nicht durch besondere Wetterlagen *Überreichweiten* auftreten. Diese beruhen auf der Reflexion der Wellen an der Trennfläche von Luftschichten unterschiedlicher Temperatur und Feuchtigkeit und sind wegen der raschen Veränderlichkeit dieser Größen starken Schwankungen unterworfen. Da die hörbaren (tonfrequenten) Schwingungen drahtlos nicht übertragen werden können, müssen sie einer hochfrequenten Welle, der Trägerwelle, überlagert werden (vgl. 11.4.4.).

11.2. Elektrische Maschinen und Geräte

Elektrische Maschinen als Energiewandler zwischen elektrischer und mechanischer Energie können bei gleichem Aufbau je nach Energierichtung als (elektrischer) Generator oder (elektrischer) Motor (Elektromotor) betrieben werden. Da die Energierichtung für die Dimensionierung eine Rolle spielt, wird die Betriebsart auf dem Leistungsschild vermerkt. Die elektrischen Maschinen haben ihre Bezeichnung nach Stromart, Drehzahlverhalten und Ausführung des magnetischen Kreises. Neben den elektrischen Maschinen werden Elektromagnete für Bewegungsvorgänge, aber auch in Festhalteeinrichtungen eingesetzt. In allen Zweigen der Elektrotechnik müssen Schaltgeräte das Ein- und Ausschalten auch großer Ströme übernehmen. Bei Störungen sind Sicherungs- und Schutzeinrichtungen erforderlich, die den Stromkreis schnell und sicher auftrennen oder die entsprechenden Schaltgeräte auslösen.

11.2.1. Elektrische Maschinen

Synchronmaschine. Bei der technischen Ausführung der Wechselstromsynchronmaschine ersetzt man die einzelne Leiterschleife in der Abb. 11.1.4-1 durch eine am Umfang verteilte Wicklung aus vielen Windungen. Bei größeren Leistungen übernimmt ein gleichstromerregter Elektromagnet die Felderzeugung, und die *Ankerwicklung* ist im Blechpaket des Ständers (Ankers) untergebracht. Die *Läufer-(Erreger-) Wicklung* erhält den Gleichstrom über Schleifringe von einer mit dem Generator direkt gekoppelten Gleichstrommaschine oder über einen Gleichrichter. Wechselstromsynchrongeneratoren werden nur für die Bahnstromversorgung mit einer Frequenz von $16^2/_3$ Hz gebaut.
Nahezu die gesamte Elektroenergie wird mit *Drehstromsynchronmaschinen* als Drehstrom in Wärme- und Wasserkraftwerken erzeugt. Von je 3 Spulen der Ankerwicklung wird ein Nord- und Südpol, d. h. ein Polpaar, Polpaarzahl $p = 1$,

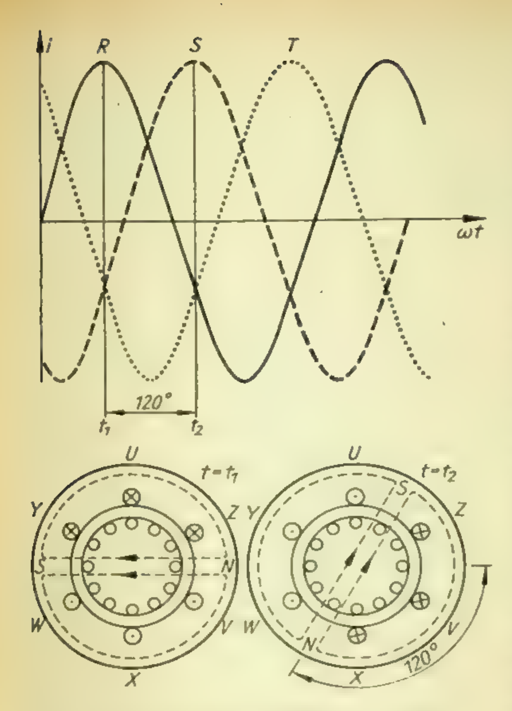


Abb. 11.2.1-1 Drehstrommotor (p = 1) mit Drehfeld zu den Zeitpunkten t_1 und t_2

ausgebildet. Mehrpolige Maschinen mit der Polpaarzahl $p > 1$ haben ausgeprägte Pole im Läufer (*Polrad*) und werden deshalb als *Schenkelpolsynchronmaschinen* bezeichnet. Man setzt sie in Wasserkraftwerken (*Wasserkraftgeneratoren*), Gasturbinen- und Dieselkraftwerken ein. Bei schnellaufenden *Turbogeneratoren* in Wärmekraftwerken muß der Läufer wegen der hohen Zentrifugalkräfte als geschlossener Zylinder (*Vollpolläufer*) mit 2 oder 4 Polen ausgeführt werden, wobei die Feldwicklung in Nuten liegt. Durch das mit dem Läufer rotierende Feld werden in den (bei $p = 1$) 3 um 120° am Umfang versetzten Spulen 3 zeitlich um 120° versetzte Spannungen induziert. Bei $p > 1$ sind $p \times$ 3 Spulen am Umfang verteilt, und der Umfangsweg von einer Spule zur anderen wird kleiner, so daß die Drehzahl *n* mit wachsender Polpaarzahl bei gleicher Frequenz sinkt.

Durch Intensivierung der Kühlung zur Abführung der Kupfer-, Ummagnetisierungs- und Reibungsverluste zuerst mit Luft, dann mit Wasserstoff und Wasser, wurden immer größere Leistungen erreicht (Schenkelpolgeneratoren z. Z. bis 600 MVA und Turbogeneratoren bis 1500 MVA).

Speist man eine Drehstromankerwicklung mit Drehstrom, so entsteht ein magnetisches Feld, dessen Lage zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 Abb. 11.2.1-1 zeigt. t_2 liegt um $^1/_3$ Periode (120° zeitlich) später als t_1, und das Feld hat sich um 120° (räumlich) gedreht. Es entsteht ein *Drehfeld*, dessen Maximalwert konstant bleibt und das mit konstanter Drehzahl umläuft. Erhöht man die Spulenzahl im Ständer und damit die Polpaarzahl *p* des Felds, so ändert sich die Drehzahl des Felds $n_D = f/p$ (z. B. $f = 50$ Hz, $p = 1$, $n_D = 3000$ U/min). Von diesem Drehfeld wird beim *Drehstromsynchronmotor* der gleichstromgespeiste Läufer mit gleicher Geschwindigkeit (*synchron*) mitgenommen (Abb. 11.2.1-2). Wegen Anlaufschwierigkeiten – der Motor kann nur bei Synchronlauf vom Feld mitgenommen werden – wird er relativ selten und nur für Dauerbetrieb, z. B. als Walzstraßen-, Meßgeräteantrieb, oder als Phasenschieber angewendet.

Drehstromasynchronmaschine. Wegen des hohen Aufwands zur Frequenzkonstanthaltung und zum Heranführen der Blindleistung für das Drehfeld entfällt praktisch der Generatorbetrieb, so daß nur der *Drehstromasynchronmotor* behandelt werden soll, der wegen seiner einfachen und robusten Ausführung, seines geringen Drehzahlabfalls (*Nebenschlußverhalten*) und weitgehender Wartungsfreiheit am häufigsten angewendet wird. Der Drehstromasynchronmotor hat den gleichen Ständer wie eine Synchronmaschine, aber einen Läufer mit einer Drehstromwicklung, die in Sternhaltung (vgl. Abb. 11.1.4-7a) geschaltet ist. Die 3 Wicklungsenden werden an Schleifringe geführt (Schleifringläufer) oder mit Leiterstäben in den Nuten (Abb. 11.2.1-2 *rechts*), die an den Stirnseiten durch Kurzschlußringe verbunden sind (*Kurzschluß-Käfigläufer*). Die Wicklungen der Kurzschlußringe werden häufig in Druckguß- oder Schleudergußverfahren hergestellt. Werden die Schleifringe beim Schleifringläufer über die Bürsten kurzgeschlossen, so weisen Schleifring-

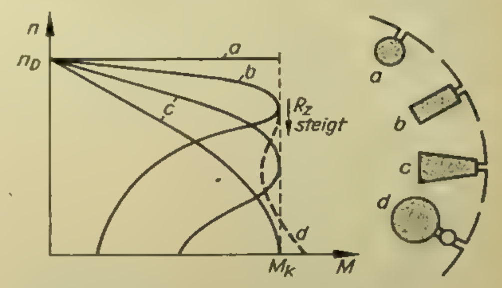


Abb. 11.2.1-2 rechts n-M-Kennlinien der Drehstrommotoren. a Synchronmotor. b Asynchronmotor mit Kurzschlußläufer und c mit Stromverdrängungsläufer (R_z = Zusatzwiderstand, M_K = Kippmoment, n_D = Drehzahl des Drehfelds); links Nutformen beim Käfigläufer. a Rundstab-, b Hochstab-, c Keilstab- und d Doppelkäfigläufer

und Kurzschlußläufermotor das gleiche Betriebsverhalten auf. Das umlaufende Drehfeld des Ständers induziert in der Läuferwicklung eine Spannung, so daß Ströme in der Kurzschlußwicklung fließen, Kräfte auftreten und der Läufer vom Drehfeld mitgenommen wird. Er kann die Drehzahl des Felds aber nicht erreichen, da dann keine Spannung mehr induziert, keine Ströme fließen und damit kein Moment entstehen würde. Es stellt sich je nach Belastung eine Drehzahldifferenz (*Schlupf*) ein; der Motor läuft *asynchron*. Der Schlupf bei Nennmoment M_n beträgt 2 bis 3 % der Drehfelddrehzahl n_D. Das größte Moment, das der Motor abgeben kann, das Kippmoment M_K, liegt bei 1,5 M_n; das Anlaufmoment $M_A \approx {}^1/_3\, M_n$ ist sehr gering (Abb. 11.2.1-2 *links*).

Beim Einschalten der Ständerwicklung fließt ein großer Anlaufstrom. Beim Schleifringläufer werden deshalb Widerstände in den Läuferkreis geschaltet, die den Strom begrenzen und im Betrieb zur Drehzahlstellung – nur kurzzeitig wegen der hohen Verluste – benutzt werden können. Gleichzeitig wird das Anlaufmoment höher. Um beim Käfigläufer den Anlaufstrom herabzusetzen, wird durch Einschalten in „Stern" (Sterndreieckschalter) die Spannung, aber auch das Anlaufmoment verringert oder durch *Stromverdrängungsläufer* trotz Verringerung des Anlaufstroms das Anlaufmoment wesentlich erhöht. Letztere haben einen 2. Läuferkäfig (Doppelkäfigläufer) oder sehr hohe Läuferleiter (Hochstabläufer), und der Strom wird während des Hochlaufs in Leiterteile hohen Ohmschen Widerstands verdrängt.

Drehstromkommutatormotoren haben einen Drehstromständer und einen Gleichstromanker mit Kommutator (vgl. Gleichstrommaschine, s. u.), dem aber Drehstrom über 3 (oder 6) Bürsten zugeführt wird. Durch Verschieben der Bürsten am Umfang oder Einspeisung über einen Stelltransformator ist eine Drehzahlstellung in großen Bereichen (üblich 1:3) möglich, z. B. in der Textilindustrie.

Einphasenmotoren (*Wechselstrommotoren*) werden eingesetzt, wo Drehstrom nicht zur Verfügung steht (Haushalt, Baustellen und Handwerk) oder sich, wie bei Fernbahnen, nicht einsetzen läßt.

Der *Einphasenreihenschlußmotor* hat im Prinzip gleichen Aufbau wie ein Gleichstrom-(Reihenschluß)-motor. Da Ständer- und Läuferstrom gleichzeitig ihre Richtung ändern, bleibt die Kraftrichtung erhalten. Er wird als *Bahnmotor* in Fernbahnlokomotiven verwendet, hierbei aber die Frequenz zum Vermindern der Funkenbildung bei der Kommutierung von 50 Hz auf $16^2/_3$ Hz herabgesetzt. Als *Universalmotor* (Allstrommotor) wird er mit 50 Hz betrieben und kann deshalb nur für kleine Leistungen gebaut

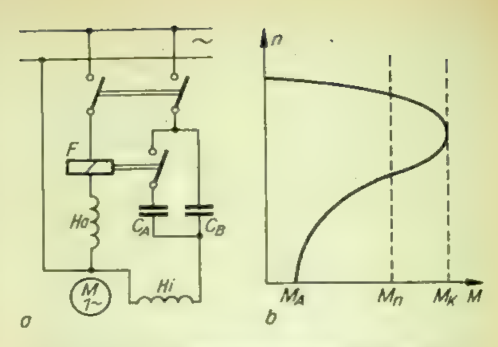


Abb. 11.2.1-3 Kondensatormotor: a Schaltbild (F = Fliehkraftschalter), b Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie

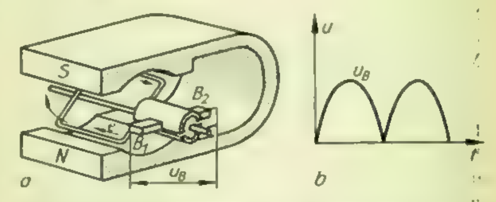


Abb. 11.2.1-4 Schema eines Gleichstromgenerators (a) und Bürstenspannungsverlauf (b)

werden, z. B. für Haushaltgeräte, wie Küchen-, Nähmaschinen, Staubsauger, Rasierapparate, für Elektrowerkzeuge, wie Handbohrmaschinen, Elektroschrauber u. a.

Im *Einphasenasynchronmotor* wird das Drehfeld durch eine Hilfswicklung (Hilfsphase, *Hi* in Abb. 11.2.1-3) erzeugt, in der mit Hilfe eines in Reihe geschalteten Kondensators (*Kondensatormotor*) die Stromstärke gegenüber der in der Hauptphase (*Ha*) um nahezu 90° phasenverschoben ist. Kondensatormotoren haben Kurzschlußläufer und werden bis zu einigen Kilowatt Leistung gebaut. Sie werden in größeren Haushaltgeräten, wie z. B. Waschmaschinen, Wäscheschleudern, Bügelmaschinen, Rasenmähern, oder größeren Elektrowerkzeugen, z. B. Kreissägen u. a., angewendet.

Im *Spaltpolmotor* wird ein Drehfeld durch eine Kurzschlußwicklung über einen Polteil hervorgerufen. Mit Kurzschlußläufer weist er ähnliche Eigenschaften wie der Kondensatormotor auf und wird vor allem bei kleinen Leistungen, z. B. in Tonbandgeräten, Plattenspielern u. a., eingesetzt.

Gleichstrommaschinen. Zur Gleichrichtung der im Anker induzierten Wechselspannung dient der Kommutator (Stromwender). Bei einer Leiterschleife (Abb. 11.2.1-4) besteht er aus 2 voneinander isolierten Schleifringhälften (Lamellen). Mit der Richtungsänderung der Spannung in der Leiterschleife bei ihrem Übergang von einem Pol zum anderen gleiten auch die Schleifringhälften zur jeweils anderen Bürste. Damit behält die an den Bürsten abgegriffene

Spannung u_B ihre Richtung bei, schwankt aber zwischen Maximalwert und Null (pulsierender Gleichstrom). Die Bürstenspannung u_B schwankt um so weniger, je größer die Anzahl der Spulen und damit auch der Kommutatorlamellen ist.

Gleichstromgeneratoren werden nur noch für besondere Aufgaben, z. B. für Notstromanlagen, Steuerungs- (Stellmotore) und Meßzwecke (Tachogenerator) sowie in Leonardsätzen (vgl. 11.3.2.), angewendet.

Beim **Gleichstrommotor** fließt der Gleichstrom über Bürste und Kommutator so in die Ankerleiter, daß die Stromrichtung und die entstehende Kraft für alle Leiter am Umfang die gleiche Richtung aufweist. Durch diese Kräfte bzw. durch ihr Drehmoment dreht sich der Anker. Durch die Bewegung werden in den Ankerspulen Spannungen induziert, die der angelegten Spannung entgegenwirken. Beim Einschalten des Motors (Anlassen) fehlt diese induzierte Spannung aber, so daß die Stromstärke durch Vorwiderstände (Anlasser) begrenzt werden muß.

Entsprechend der Schaltung von Anker- und Feldwicklung unterscheidet man Reihenschluß- und Nebenschlußmotoren. Im *Gleichstromnebenschlußmotor* (Abb. 11.2.1-5) ist die Feldwicklung (*C-D*) parallel (im Nebenschluß) zum Anker (*A-B*) geschaltet; die Drehzahl *n* ändert sich mit steigender Belastung sehr wenig (Nebenschlußverhalten). Die Drehzahl läßt sich durch einen Vorwiderstand im Erregerkreis erhöhen und durch Ankervorwiderstand oder durch Spannungsabsenkung im Ankerkreis vermindern. Der Nebenschlußmotor wird für große Drehzahlstellbereiche und sehr feinstufige Drehzahlstellung, z. B. im Leonardsatz (vgl. 11.3.2.) für Förder-, Werkzeug-, Verarbeitungsmaschinen, Walzgerüst-, Schiffsantriebe, eingesetzt.

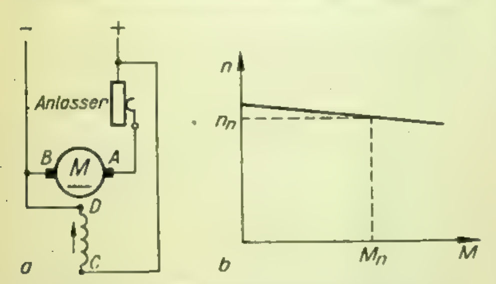


Abb. 11.2.1-5 Gleichstromnebenschlußmotor: a Schaltbild, b Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie

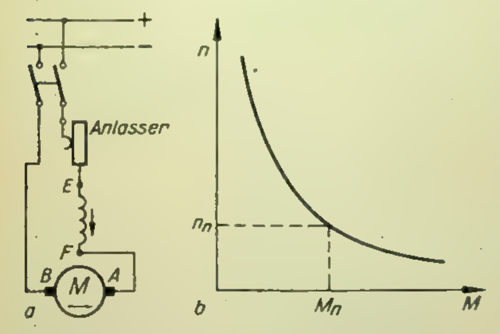


Abb. 11.2.1-6 Gleichstromreihenschlußmotor: a Schaltbild, b Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie

Im *Gleichstromreihenschlußmotor* sind die Feldwicklung (*E-F*) und die Ankerwicklung (*A-B*) hintereinander (in Reihe) geschaltet; die Drehzahl sinkt mit steigender Belastung stark ab (*Reihenschlußverhalten*, Abb. 11.2.1-6). Der Gleichstromreihenschlußmotor wird in Triebfahrzeugen der Straßen-, S- und U-Bahn sowie in Hebezeugen verwendet.

Da Gleichstrom heute vorwiegend durch Thyristorstromrichter erzeugt wird, erhält er Wechselstromkomponenten (Mischstrom), weshalb mit diesem Strom gespeiste Motoren auch als Mischstrommotoren bezeichnet werden.

Linearmotoren. Drehstrom- und Gleichstrommotoren lassen sich auch als Linearmotoren ausführen, wodurch Linearbewegungen direkt entstehen und nicht erst aus Drehbewegungen umgeformt werden müssen. Im Prinzip kann man sich einen Linearmotor aus einem rotierenden Motor durch Aufschneiden und Abrollen auf einer Ebene entstanden denken. Der Läufer kann z. B. beim asynchronen Linearmotor durch eine Metallschiene gebildet werden. Anwenden lassen sich Linearmotoren z. B. für den Antrieb von Hochgeschwindigkeitsbahnen (Tafel 62), Meßgeräte, Türantriebe, Rolltreppen.

11.2.2. Transformatoren

Einphasentransformatoren haben meist 2 getrennte Wicklungen, die Primärwicklung (*p*) und die Sekundärwicklung (*s*), mit unterschiedlicher Windungszahl w_p und w_s, die auf einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt und dadurch magnetisch gekoppelt sind (Abb. 11.2.2-1). Der Eisenkern wird auch hier zur Unterdrückung der Wirbelströme aus gegeneinander isolierten dünnen Blechen aufgebaut. Beim Anlegen einer Spannung an die Primärwicklung wird durch den (vorwiegend im Eisenkern, vgl. 11.1.2.) entstehenden magnetischen Fluß in der Primärwicklung eine der Primärspannung U_p gleichgroße *Gegenspannung* und in der Sekundärwicklung die *Sekundärspannung* U_s induziert. Vernachlässigt man den Teil des Felds, der die Sekundärwicklung nicht durchsetzt (*Streufeld*), und außerdem die Ohmschen Spannungsabfälle, so verhalten sich die Spannungen wie die Windungszahlen $U_p : U_s = w_p : w_s$, während die Frequenz gleichbleibt. Zur Verringerung des

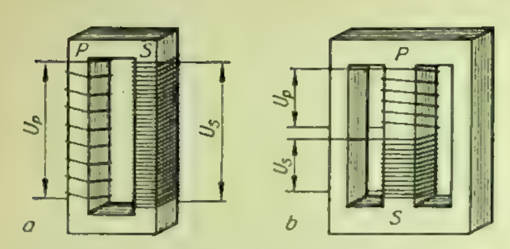


Abb. 11.2.2-1 Einphasentransformatoren (Prinzip): a Kerntrafo, b Manteltrafo

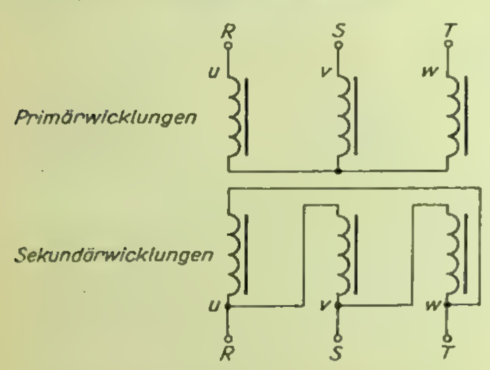


Abb. 11.2.2-2 Beispiel für die Stern-Dreieck-(Y-d)-Schaltung eines Drehstromtransformators

Streufelds werden in der Praxis Primär- und Sekundärwicklung konzentrisch übereinandergewickelt.
Beim *Kerntransformator* sind meist alle Schenkel bewickelt, während beim *Manteltransformator* Joche und Rückschluß-(Außen-)Schenkel mantelartig die Wicklung umhüllen.
Drehstromtransformatoren haben für jede Phase 2 Wicklungen, die primär- und sekundärseitig in Stern- oder Dreieckschaltung verbunden sein können (Abb. 11.2.2-2).
Transformatoren werden zur Veränderung der Spannungshöhe als *Umspanner* in der Energieversorgung und *Netztransformatoren* in elektronischen Geräten, in Haushalten in elektrischen Klingeln und für Modelleisenbahnen eingesetzt. In der Meßtechnik dienen sie als *Strom-* und *Spannungswandler* zur Übersetzung von Meßgrößen auf eine für Meßgeräte zulässige Größe, z. B. 100 V bzw. 5 A oder 1 A. Als *Trenntransformatoren* werden sie zur galvanischen Trennung durch Aufhebung der leitenden Verbindung von Stromkreisen für Schutz- oder Meßzwecke und als *Übertrager* zur Widerstandsanpassung verwendet. Bei Stelltransformatoren kann man die Sekundärspannung durch Umschaltung auf verschiedene Wicklungsanzapfungen oder durch Verschieben von Kohlerollen auf der blanken Wicklung verändern. Mit *Prüftransformatoren* werden elektrische Geräte mit Spannungen bis 7 MV geprüft. Transformatoren kleiner Leistung kommen mit Luftkühlung aus, bei größeren Leistungen müssen sie dagegen in Ölkessel eingebaut werden (*Öltransformatoren*), um die Verlustwärme abzuführen und die Spannungsfestigkeit zu erhöhen.

11.2.3. Magnete

Dauermagnete aus hartmagnetischen Werkstoffen werden zur Erregung des magnetischen Felds in Geräten kleiner Leistung, z. B. Elektromotoren, Meßgeräten, Relais u. a., sowie als Haft- und Scheidemagnete eingesetzt. Hierbei werden Gefügeumwandlungsstähle aus FeCrC-, FeCoC-Legierungen, ausscheidungshärtbare Stähle ohne und mit Vorzugslage aus FeNiCu-, CoNiCu-, FeNiAl-Legierungen, Feinstpulvermagnete aus Fe-, FeCo-, MnBi-Legierungen sowie FeBa-Ferrite verwendet.
Elektromagnete haben eine stromdurchflossene Spule und einen Kern aus weichmagnetischem Material. Sie werden als *Hebemagnete* für Lasten bis zu 30 t und zum kraftschlüssigen Halten ferromagnetischer Werkstücke an Schleifmaschinen eingesetzt. In Beschleunigern für Kernumwandlungen erregen sie das Magnetfeld ebenso wie in allen elektrischen Maschinen, bei denen man aber von Polen und Feldwicklungen spricht. Weiterhin werden Elektromagnete als *Stellmagnete* in der Automatisierungstechnik und zum Anziehen der Betätigungselemente von Schützen und Relais eingesetzt (Abb. 11.2.3-1). Durch Einfügen hartmagnetischer Teile entstehen polarisierte Elektromagnete, die in definierter Lage stehenbleiben, z. B. beim Telegrafenrelais.
Für den magnetischen Kreis werden Dynamoblech, bei höheren Frequenzen auch ultra-

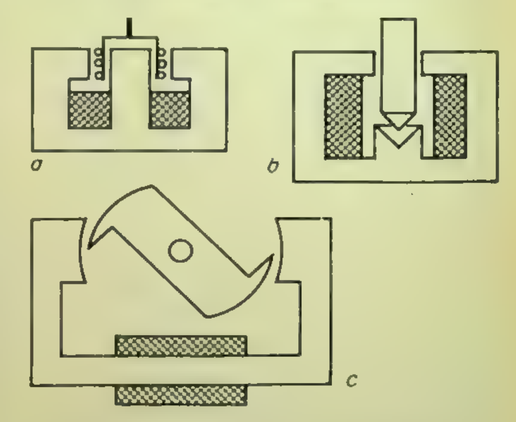


Abb. 11.2.3-1 Stell- und Betätigungsmagnete: a Tauchspul-, b Tauchanker-, c Drehankermagnet

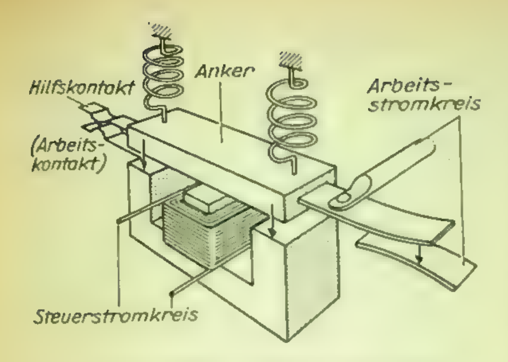


Abb. 11.2.4-1 Hilfskontakt (Arbeitskontakt)

dünne Bänder (< 0,1 mm) aus FeNi, Pulverkerne aus FeNi und FeSiAl sowie weichmagnetische Ferrite eingesetzt. In letzter Zeit werden Magnetsysteme, z. B. für thermonukleare Teilchenbeschleuniger und für die Fahrzeugaufhängung bei Hochgeschwindigkeitsbahnen mit Spulen ohne Eisen unter Ausnutzung der *Supraleitung* entwickelt, d. h. unter Ausnutzung des Verschwindens des Ohmschen Widerstands in der Nähe des absoluten Nullpunkts (< 20 K). Mit supraleitenden Spulen können außerdem sehr hohe Induktionen erreicht werden.

11.2.4. Schalt- und Schutzgeräte

Schaltgeräte, wie *Schalter*, *Schütze*, *Relais*, schließen und unterbrechen Stromkreise. *Sicherungen* und *Schutzeinrichtungen* trennen Stromkreise bei Störungen. Sie unterscheiden sich je nach Verwendungszweck und Einsatzgebiet sehr weitgehend in ihrem Aufbau.

Hoch- und Niederspannungsschalter sind meist fernbetätigte Leistungsschalter, die mit Hilfe einer elektromagnetischen Auslösung auch kurzgeschlossene Stromkreise abschalten können und außerdem eine Überstromauslösung aufweisen, die bei länger anhaltender Überlastung anspricht. Sie übernehmen damit auch den Schutz nachgeschalteter Anlagenteile (Leitungen und Geräte). Bei dem ebenfalls fernbetätigten Schaltschütz ist die Einschaltstellung mechanisch nicht verriegelt (Abb. 11.2.4-1). Beim Betätigen eines „Ein"-Tasters *e* (Tastschalter) wird der Steuerstromkreis (Abb. 11.2.4-2) geschlossen und die Schützspule *c* erregt. Sie zieht den Anker an, der die Kontakte des *Arbeits-(Haupt-) Stromkreises* schließt. Da der Tastschalter, dessen einfachste Ausführung der Klingelknopf ist, nach Entfernen der Antriebskraft in die Ausgangslage zurückkehrt, überbrückt man ihn durch einen *Selbsthaltekontakt*, d. h. einen *Hilfskontakt* des Schützes, der durch die Ankerbewegung ebenfalls geschlossen wird und deshalb ein Arbeitskontakt sein muß, der in Ruhestellung geöffnet ist. Das Ausschalten geschieht durch Betätigen des „Aus"-Tasters *a*. Mit weiteren Hilfskontakten können durch *Verriegeln* fehlerhafte Schalthandlungen verhindert werden.

Unter dem Begriff „Kontakt" ist allgemein ein Zustand zu verstehen, der durch *Schaltstücke* bewirkt wird, die Teile von Schaltgliedern sind. Schützenschaltungen werden auch in automatisierten Produktionsanlagen verwendet.

Relais weisen im Prinzip den gleichen Aufbau wie Schütze und auch zahlreiche Hilfskontakte auf, sind aber für wesentlich kleinere Stromstärken ausgelegt. Moderne Halbleiterbauelemente (vgl. 11.5.3.) lösen zunehmend die mechanischen Relais ab. Durchlassen und Sperren des Stroms übernehmen hier Steuerimpulse. Sie arbeiten ohne Schaltlichtbogen und damit nahezu verschleißfrei.

Steuerschalter dienen zum Ändern der Betriebsgrößen im Stromkreis. Als *Stellschalter* bleiben sie im Gegensatz zu den Tastschaltern in der jeweiligen Schaltstellung. Sie werden als Nocken- oder Walzenschalter (Steuerwalzen), z. B. als Fahrschalter zum Steuern der Motoren in elektrischen Bahnen oder als Anlaßschalter (Anlasser) für Elektromotoren, eingesetzt. *Reglerschalter* in Reglern, z. B. für Generatoren, weisen ständig Schaltbewegungen auf.

Sicherungen übernehmen in Niederspannungsstromkreisen den Schutz der angeschlossenen Leitungen und als *Gerätesicherung* auch den Schutz des Geräts vor Über- und Kurzschlußströmen. *Schmelzsicherungen* enthalten im Schmelzeinsatz einen bei zu hoher Stromstärke schmelzenden Draht in einem Glasrohr oder in Quarzsand eingebettet und sind von einem Keramikkörper umgeben. Eine Kennmarke zeigt bei letzterem die Betriebsbereitschaft an, z. B. grün für 6 A, rot für 10 A. Diese *Leitungsschutzsicherungen* werden als *Patronensicherung* für Anlagen mit niedriger und als *Niederspannungs-Hochleistung-(NH)-Sicherungen* für Anlagen mit hoher Kurzschlußstromstärke hergestellt. Bei der Patronensicherung verhindert eine Paßschraube, daß Patronen mit höherer Nennstromstärke eingesetzt werden.

Schutzeinrichtungen. Beim *Leitungsschutzschalter*, unexakt auch *Sicherungsautomat* genannt

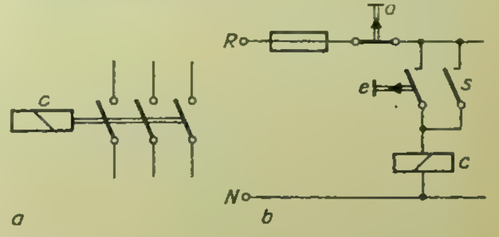


Abb. 11.2.4-2* a *Hauptstromkreis*, b *Stromlaufplan

(Abb. 11.2.4-3), schaltet ein thermischer Auslöser (*T*), eine Bimetallklinke, bei relativ kleiner Überstromstärke – bei der die Leitungserwärmung den zulässigen Grenzwert erst nach längerer Zeit erreicht – nach einer mit steigender Stromstärke fallenden Zeitspanne ab. Bei Kurzschluß sorgt eine *Magnetspule* (*M*) dafür, daß die Kontakte und damit der gefährdete Stromkreis mit Hilfe des Kniegelenks (*G*) schnell aufgetrennt werden. Mit dem Druckknopf (*E*) kann der Stromkreis sofort wieder geschlossen werden.

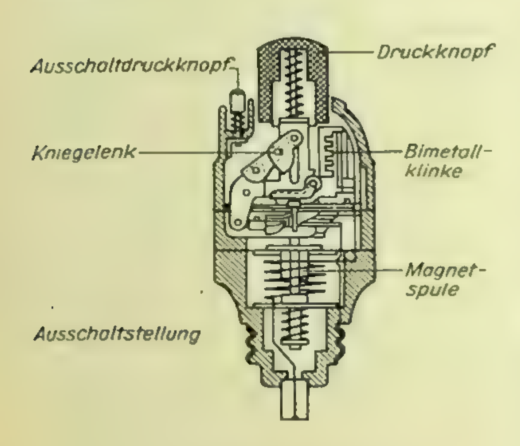


Abb. 11.2.4-3 Leitungsschutzschalter

Auch Lastschalter haben Bimetallauslöser und magnetische Auslöser ähnlicher Bauart. Bei Störungen übernehmen *Überstrom-* und *Kurzschlußstromauslöser* das Auslösen der Leistungsschalter in Energieversorgungseinrichtungen. Um nur den betroffenen Anlagenteil oder das fehlerhafte Gerät abzuschalten, werden *Relaisschutzsysteme* angewendet.

11.3. Übertragung, Umformung und Anwendung elektrischer Energie

Elektroenergieerzeugung und -übertragung erfolgen heute – abgesehen von der Hochspannungsgleichstromübertragung und der Bahnstromversorgung – ausschließlich mittels Drehstrom von 50 Hz. Häufig müssen aber Verbraucher mit Gleich- oder Wechselstrom anderer Frequenz gespeist und die elektrische Energie in Stromrichtern oder auch in Maschinenumformern umgeformt werden. Mit Hilfe von Energiewandlern wird elektrische Energie in andere Energieformen umgewandelt, z. B. in mechanische, Wärme- und Lichtenergie.

11.3.1. Übertragung elektrischer Energie

Elektrische Energieversorgungsanlagen (Starkstromanlagen) übernehmen die Übertragung elektrischer Energie von den Generatoren in den Kraftwerken bis zu den Verbrauchern in Industrie und Haushalten. Die Kraftwerke eines Landes bzw. mehrerer Länder sind über *Hochspannungsleitungen* in einem *Verbundnetz* zusammengefaßt, z. B. das Verbundnetz „Frieden" der europäischen RGW-Staaten. Damit wird die Zuverlässigkeit der Energiebereitstellung erhöht und ein größerer Wirkungsgrad bei Energieerzeugung und -übertragung erreicht, da sich Belastungsspitzen durch Zeitunterschiede besser auf die Kraftwerke verteilen und eine effektivere Elektroenergieerzeugung ermöglichen. Zusätzlich können Verbundnetze durch *Hochspannungsgleichstromübertragung* (*HGÜ*) gekoppelt werden, z. B. das sibirische und europäische Verbundnetz der UdSSR. Die Hochspannung wird gleichgerichtet und nach der Übertragung mit Wechselrichtern wieder in Wechselstrom umgeformt. Da die Verbundnetze über große Gebiete ausgedehnt werden und die Verluste in den Leitungen vom Quadrat der Stromstärke abhängen, versucht man Hochspannungsleitungen für immer höhere Spannungen und damit möglichst kleiner Stromstärke auszulegen. Schwierigkeiten bereiten die bei Wechselstrom hoher Spannung durch die Ionisierung der Luft auftretenden Sprüherscheinungen (*Korona*), die zu *Koronaverlusten* führen. Höchste Übertragungsspannungen sind z. Z. 900 kV Drehstrom (versuchsweise 1 500 kV) und 1 500 kV Gleichstrom. In der DDR beträgt die höchste Übertragungsspannung 400 kV.

Die Energie wird von den Verbundnetzen an *Verteilungsnetze*, *Mittelspannungsnetze* bis 200 kV, weitergeführt. Innerhalb eines Ortes oder Stadtteils verlegt man *Niederspannungsnetze* mit 380/200 V. Für Steuer-, Signal- und Nachrichtenanlagen wird auf 100 V oder *Kleinspannungen* bis 42 V reduziert.

Den Weg der Energie zum Verbraucher zeigt auch Abb. 11.3.1-1 wobei nur der direkte Weg eingetragen und die Querverbindungen im Netz und zu anderen Kraftwerken fehlen. Unmittelbar mit dem Generator ist ein (Block-)Transformator verbunden, der die Spannung von der Maschinenspannung, z. B. 10,5 kV, 15,75 kV, auf die Übertragungsspannung transformiert. In *Schaltanlagen*, die sich aus *Sammelschienen*, d. h. Querverbindungen mit Abgängen, Hochspannungsschaltern, Meßgeräten und Schutzeinrichtungen, zusammensetzen, wird die Energie zu den einzelnen abgehenden Leitungen geführt. An Netzknotenpunkten befinden sich *Hauptumspannwerke*, die ebenfalls wieder Transformatoren und Schaltanlagen umfassen. In den *Mittelspannungs-* und *Ortsnetzumspannwerken* sind die gleichen Elemente vorhanden, wenn sie auch einfacher aufgebaut sind und

geringere Leistung haben. Schaltanlagen hoher Spannung und Leistung werden als *Freiluftschaltanlagen* ohne Gebäudeschutz und in einer Ebene ausgeführt. Sie erfordern geringere Kosten, beanspruchen aber sehr viel Platz, so daß man auch bei höheren Spannungen (z. Z. bis 100 kV) verstärkt mehrstöckige *Innenraum-Schaltanlagen* baut, was durch die Entwicklung neuer feststoffisolierter bzw. SF_6-(Schwefelhexafluorid)-Schaltanlagen möglich wird.

Fernleitungen werden meist als *Freileitungen*, Leitungen in Verteilungsnetzen teils als Freileitungen, in Ballungsgebieten zunehmend auch als *Kabel*, verlegt. Niederspannungsleitungen werden nur noch auf dem Land wegen der geringeren Kosten als Freileitungen geführt. Heute wird Drehstrom bis zum Endverbraucher geführt, bzw. die Wechselstromendverbraucher werden auf die 3 Phasen des Drehstromnetzes verteilt.

Leiterwerkstoffe sind aus *Kupfer, Aluminium* und Aluminiumlegierungen. *Blanke Leitungen* werden vor allem als Freileitungen, Sammelschienen in Schaltanlagen und *Fahrdrähte* für elektrische Bahnen verwendet. Wird eine Leitung aus Kupfer durch eine gleichen Widerstands aus Aluminium ersetzt, so wiegt diese trotz ihres 1,6mal so großen Querschnitts nur halb soviel. Die geringere Festigkeit des Aluminiums wird durch Aufteilen in verseilte dünne Einzelleiter sowie Einziehen eines oder mehrerer verzinkter Stahldrähte ausgeglichen. Das hierfür meist übliche Querschnittverhältnis von Stahl zu Aluminium beträgt 1:6, bei Höchstspannungsleitungen 1:3.

Freileitungen werden entweder an Stütz- (*Stützer*) oder Hängeisolatoren aus Hartporzellan befestigt, die eine hohe Spannungsfestigkeit gegen *Durchschlag* aufweisen. Zur Vermeidung von *Überschlägen* längs der Oberfläche haben sie schirmartige Auswüchse, deren unterer Teil weniger verschmutzt oder feucht wird. Abmessung

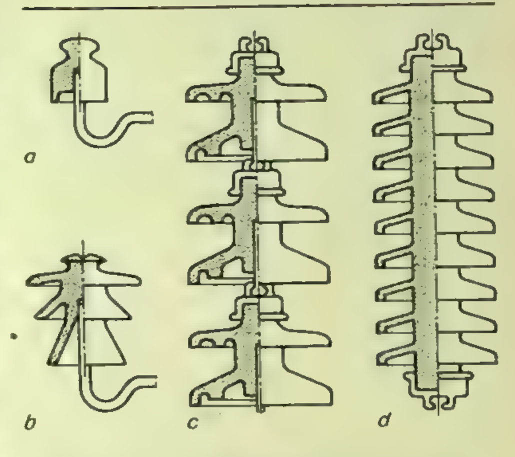


*Abb. 11.3.1-2 Freileitungsisolatoren: **a** Fernmelde-, **b** Weitschirmisolator, **c** Hängekette aus Vollkernisolatoren, **d** Langstabisolator*

und Form der Isolatoren richten sich nach der Leiterspannung, bei 380 kV z. B. 3 Hängestabisolatoren (Tafel 21) hinter- bzw. untereinander (Abb. 11.3.1-2). Die Isolatoren werden in Schaltanlagen auf Profilstahlgerüsten oder bei Freileitungen auf *Masten* angebracht.

Kabel. Innerhalb von Städten und Industriezentren wird die elektrische Energie meist durch *Erdkabel* zugeführt. Beim *Massekabel* sind die einzelnen Leiter durch Ölpapier voneinander isoliert und in Bitumen eingebettet. Die Außenhaut bildet ein nahtloser Blei- oder Plastmantel, der mit Stahlflachprofil bewehrt und mit bitumengetränkter Jute überzogen ist. Für Spannungen über 40 kV würde der Querschnitt dieser

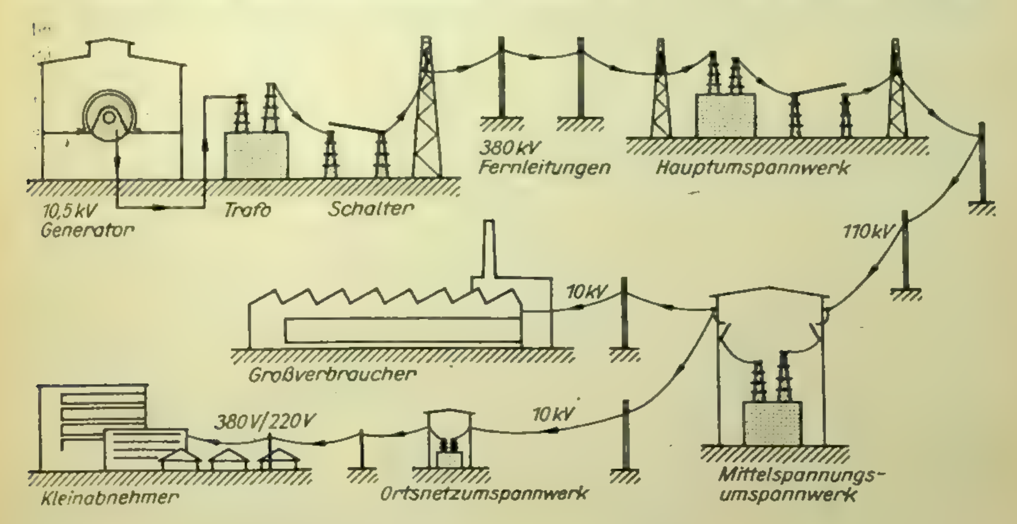


Abb. 11.3.1-1 *Energieversorgung (Schema)*

Kabel zu groß werden und man verwendet dann *Druckgaskabel*, ein masseisoliertes Mehrleiterkabel in einem mit Stickstoff von 0,4 bis 1,5 MPa Überdruck gefüllten Stahlrohr, oder Ölkabel, in dem das Bitumen durch ein dünnflüssiges Öl ersetzt ist. Dieses Öl kann bei Erwärmung in an den Kabelenden angebrachte Ausgleichsgefäße und bei Abkühlung wieder in das Kabelinnere strömen. Die äußeren Hüllen sind die gleichen wie beim Massekabel. Weiterentwicklungen haben *supraleitende Kabel* zum Ziel. Um diese Kabel auf Temperaturen < 20 K zu halten, sind sehr hohe Kühlleistungen erforderlich.

Kabel werden ≈ 70 cm unter der Erdoberfläche in Sandbettung verlegt und zum Schutz gegen mechanische Zerstörung durch Kabelabdecksteine (Betonsteine oder Hauben aus Ton) abgedeckt bzw. bei höherer mechanischer Belastung, z. B. unter Fahrstraßen, durch Kabelformsteine aus Beton geführt. Innerhalb von Gebäuden werden Kabel in abgedeckten Kabelkanälen oder auf Konsolen an Wänden verlegt. Zum Verbinden von Kabeln und auch für Abzweigungen verwendet man mit Epoxidharz oder mit Bitumen ausgegossene Stahlgehäusemuffen (*Kabelmuffen*). Ein *Kabelendverschluß* ermöglicht den Anschluß des Kabels.

Das Verlegen der Leitungen beim Endverbraucher, die Montage der Verzweigungsstellen und Steckdosen sowie den Anschluß elektrischer Geräte bezeichnet man als *Elektroinstallation*. Hierbei werden gummi- oder plastisolierte Leitungen als *kabelähnliche Leitungen* oder zum Schutz gegen mechanische Beschädigung in PVC-, Stahl-, Stahlpanzer-), biegsamem Kopexrohr oder in Isolierrohr mit gefalztem Stahlrohr in *Auf-* oder *Unterputzinstallation* verlegt. Die Abzweigdosen, Schalter, Steckdosen usw. sind der Aufputz- bzw. Imputzverlegung angepaßt. In feuchten Räumen ist Feuchtrauminstallation mit besonders gekapselten bzw. abgedeckten Dosen und Schaltern vorgeschrieben. Für den industriellen Wohnungsbau, für Gesellschaftsbauten und für die komplexe Instandsetzung wurden der Montage- und Fließbauweise angepaßte Installationssysteme, wie das Schienen- und Leitungskanalsystem sowie das Fußleistenkanalsystem, entwickelt, die hohe Arbeitsproduktivität beim Verlegen ermöglichen.

Für den flexiblen Anschluß elektrischer Geräte sind Steckvorrichtungen, bestehend aus *Steckdose* und *Stecker*, entwickelt worden. Ist nicht nur der Stecker, sondern auch die Gegenseite beweglich, so spricht man von einer Kupplung. Steckvorrichtungen für Drehstrom (Kraftstrom) müssen durch einen Kragen (Kragensteckvorrichtung) berührungssicher sein. Drehstromsteckvorrichtungen mit Nulleiter werden außerdem mit einer Führungsnase versehen, damit die [illegible] werden können.

11.3.2. Umformung elektrischer Energie

Die Umformung elektrischer Energie, d. h. die Umformung der Spannungs- bzw. Stromart und der Frequenz, erfolgt in Maschinenumformern und Stromrichtern. Die Änderung des Spannungswerts übernehmen Transformatoren (vgl. 11.2.2.).

Maschinenumformer bestehen aus 2 oder mehr elektrischen Maschinen, die eine vorhandene Stromart über mechanische Bewegung in eine andere verwandeln, z. B. Drehstrom in Gleichstrom. Bei einem *Leonardsatz* z. B. sind ein Drehstromasynchronmotor, ein Gleichstromgenerator und eine Gleichstromerregermaschine durch eine Welle gekuppelt. Die Spannung des Generators kann in Größe und Richtung durch Änderung der Erregerspannung in weiten Grenzen variiert und dadurch die Drehzahl eines angeschlossenen Motors gesteuert werden, z. B. bei Förderanlagen, Decks- und Rudermaschinen. Muß außer der Stromart auch die Frequenz gewandelt werden, so setzt man, z. B. bei Holzbearbeitungsmaschinen, einen – meist asynchronen – *Frequenzumformer* ein. In diesem treibt ein drehzahlveränderlicher Elektromotor eine Asynchronmaschine mit Schleifringläufer an, deren Ständer vom Drehstromnetz gespeist wird. Die Frequenz der vom Läufer abgegebenen

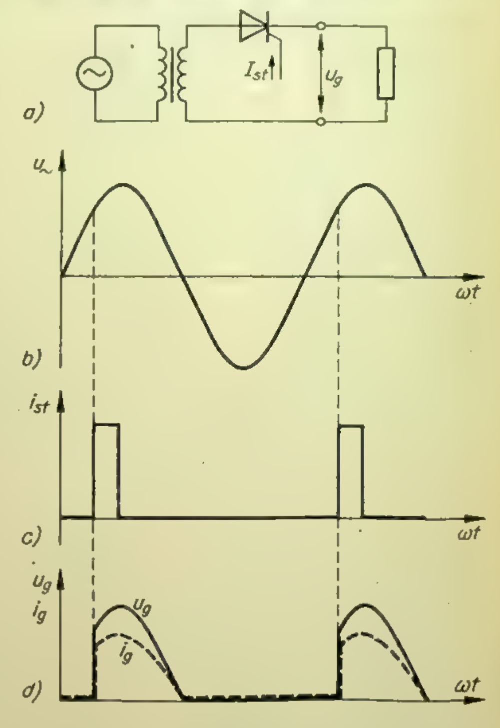


Abb. 11.3.2-1 Phasenanschnittsteuerung: a Schaltbild, b Wechselspannung, c Steuerstrom, d Gleichspannungs- bzw. -stromverlauf

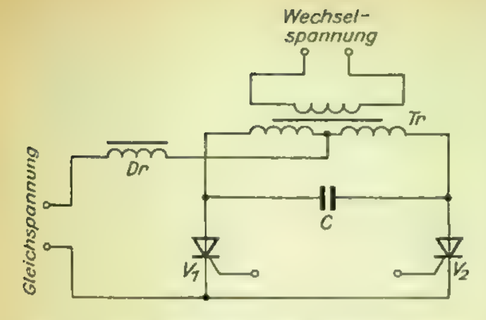


Abb. 11.3.2-2 Schaltung eines Wechselrichters

Spannung ist vom Schlupf und damit der Drehzahl abhängig.

Stromrichter formen Stromarten durch Ventilwirkung um, d. h., sie lassen den Strom nur in einer Richtung durch. Man unterscheidet *Gleichrichter*, die Wechsel- oder Drehstrom in Gleichstrom, *Wechselrichter*, die Gleich- in Wechsel- oder Drehstrom und *Umrichter*, die Frequenz und Phasenzahl eines Wechselstroms umformen. In bezug auf die Wirkungsweise unterscheidet man *Kontaktstromrichter*, in denen durch einen Synchronmotor Kontakte beim Nulldurchgang der Stromstärke im Takt der Wechselstromfrequenz geöffnet und geschlossen werden, und *Halbleiterstromrichter*, in denen die Sperrschichtwirkung eines *pn*-Übergangs (vgl. 11.1.1.) zum Gleichrichten dient. Bei letzteren haben die Siliziumstromrichter (Thyristoren) besondere Bedeutung, die als gesteuerte Gleichrichter, als Wechselrichter und Umrichter eingesetzt werden.

Man unterscheidet bei Gleichrichtern *Durchlaß-* und *Sperrichtung*. Wird in Sperrichtung eine bestimmte Spannung, die *Sperrspannung*, überschritten, so tritt ein Durchbruch auf. Diese Sperrspannung beträgt z. B. bei Selengleichrichtern 18 V, bei Siliziumgleichrichtern dagegen bis 3,5 kV. Bei der *Phasenanschnittsteuerung* (Abb. 11.3.2-1) kann durch zeitliche Verschiebung des Steuerimpulses die „Zündung" des Thyristors und damit der Mittelwert der Gleichspannung geändert werden.

Wechselrichter weisen eine dem Gleichrichterbetrieb entgegengesetzte Energierichtung auf. Wechselrichterbetrieb entsteht bei einem gesteuerten mehrphasigen Gleichrichter durch Umkehren der Speiserichtung. Wechselrichter mit variabler Frequenz der Wechselspannung werden z. B. zur Drehzahlsteuerung von Drehstromasynchronmotoren benutzt. Abb. 11.3.2-2 zeigt die Schaltung eines einfachen selbsterregten Wechselrichters. Bei Anlegen einer Gleichspannung entsteht auf der Sekundärseite des Transformators (*Tr*) eine Wechselspannung, deren Frequenz durch geeignete Steuerung der Thyristoren (V_1 und V_2) geändert werden kann. Der Kommutierungskondensator (*C*) bewirkt beim Öffnen (Durchlassen) des einen Thyristors das gleichzeitige Schließen (Sperren) des anderen Thyristors. Die Drossel (*D*) glättet den Gleichstrom.

Siliziumdioden erreichen Sperrspannungen bis zu mehreren 10^3 V und Stromstärken von einigen 10^3 A. Bei den Thyristoren, gesteuerten Halbleiterbauelementen, erzielt man Werte gleicher Größenordnung.

Transduktoren bestehen aus einem Eisenkern mit scharf ausgeprägtem Sättigungsknick der Magnetisierungskennlinie, der 2 Wicklungen (*Arbeits-* und *Steuerwicklung*) trägt. Der durch die Steuerwicklung fließende Gleichstrom dient zum Vormagnetisieren des Eisenkerns und damit zum Steuern des Wechselstroms in der Arbeitswicklung. Transduktoren werden zur Drehzahlsteuerung elektrischer Antriebe eingesetzt, durch Thyristoren aber immer mehr verdrängt.

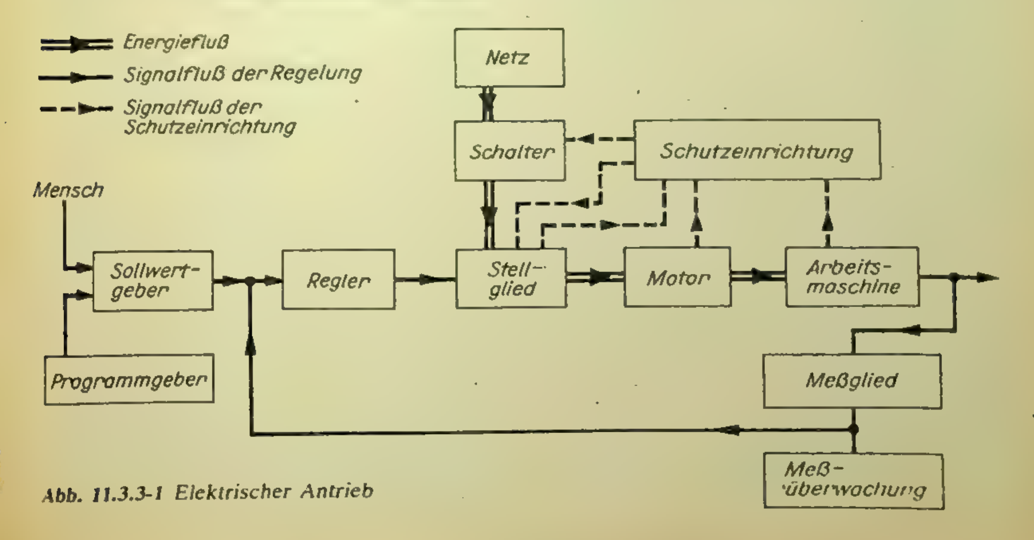


Abb. 11.3.3-1 Elektrischer Antrieb

11.3.3. Anwendung elektrischer Energie

Elektrische Antriebe bestehen im einfachsten Fall aus *Elektromotor* und *Arbeitsmaschine*, zu der noch eine Schwungmasse kommen kann. Für Steuerungs- und Schutzfunktionen enthält ein Antrieb oft noch zusätzliche Elemente (Abb. 11.3.3-1). Je nach Arbeitsmaschine bzw. -mechanismus, nach vorhandener Stromart, Drehzahlstellung, Einsatzort und Betriebsart sind die Elektromotoren (vgl. 11.2.1.) auszuwählen. Bei der *Betriebsart* unterscheidet man z. B. *Dauer-* und *Kurzzeitbetrieb*. Bei nur kurzzeitigem Einschalten kann ein Motor kleinerer Leistung gewählt werden, da er sich in der kurzen Zeit nicht bis zur zulässigen Temperaturgrenze erwärmt. In diesem Falle wird die zulässige *Einschaltdauer ED* auf dem Leistungsschild vermerkt. Bei der Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors über den Ankerstrom mißt man die Drehzahl (*n*) mit einem Tachogenerator (*TG*), einem permanenterregten Gleichstromgenerator, dessen Spannung in weiten Grenzen der Drehzahl proportional ist. Diese Spannung und der Istwert des Stroms, der über einen Stromumformer (*U*) gemessen wird, werden im Regler (*R*) mit Sollwerten verglichen. Bei Abweichungen wird eine Regelgröße gebildet, die den Leistungssteller (*L-St*) beeinflußt (Abb. 11.3.3-2).

Elektrowärme. Die Kosten für die Wärmeerzeugung aus elektrischer Energie, Stadt- oder Ferngas und aus Kohle stehen im Verhältnis 100:80:30. Die Wärmeerzeugung aus Elektroenergie ist also am teuersten, hat aber den Vorteil einfacher Temperaturregelbarkeit, des Wegfalls von Brennstoff- und Aschetransport, von Schornsteinen und Abgasen sowie des Sauerstoffverbrauchs, ferner die Vorteile sofortiger Betriebsbereitschaft und hoher konzentrierter Wärmeleistung.

Wichtige technische Anwendungsgebiete der Elektrowärme sind die Stahlherstellung und -schmelzung (vgl. 3.2.2.), Wärmebehandlung von Metallen, Schweißen von Metallen (vgl. 8.4.1.) und Plasten, Kurzwellendiathermie und Elektrochirurgie (vgl. 12.4.7.), Brenn-, Härte- und Trokkenprozesse u. a.

Sehr häufig wird Elektroenergie in *Heizleitern* in Wärme umgewandelt. Sie werden als Drähte,

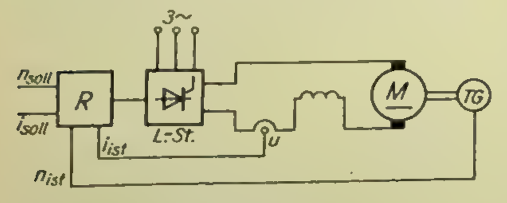


Abb. 11.3.3-2 Prinzip der Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors

Stäbe oder Bänder aus CrNi-Stahl oder ähnlichen Legierungen hergestellt, die einen hohen spezifischen Widerstand und hohen Schmelzpunkt haben und bei der hohen Betriebstemperatur noch zunderfest sind. Die Betriebstemperaturen betragen 200 bis 1300 °C, mit Platindraht bis 1500 °C, mit Silitstäben (Siliziumkarbidstäbe) bis zu 1400 °C und bei Kohlerohren bis 3000 °C.

Kochgeräte. Das einfachste Gerät ist der Tauchsieder, bei dem der Heizleiter in ein spiralförmig gebogenes Kupfer- oder Messingrohr eingepreßt und dieses zum Schutz gegen Korrosion außen vernickelt ist. Der Wirkungsgrad eines Tauchsieders ist sehr hoch, da fast die gesamte erzeugte Wärme vom umgebenden Wasser aufgenommen wird.

Elektrische Kochgefäße oder *Wärmegeräte* sind Behälter aus Aluminium oder vernickeltem Messingblech, in deren Boden oder Wandung Heizleiter eingebaut sind. Sie finden als Kochtöpfe, Teekessel, Kaffeemaschinen, Leimkocher, Sterilisierungsgeräte u. ä. Anwendung.

Kochplatten beheizen beliebige Gefäße, wobei aber der Wärmeverlust größer ist, da Behälter und Wärmeerzeuger getrennt sind. Dafür vertragen Kochplatten die ohne aufgesetztes Gefäß eintretende Überhitzung, während bei ungefüllten Kochgefäßen der Heizleiter zerstört wird.

Elektroherde umfassen in einer Herdplatte 2 bis 4 Kochplatten, von denen meist eine mit doppelter Heizleistung zum Schnellkochen ausgelegt ist. Stufenschalter zum Abschalten eines Teils der Heizleiter ermöglichen sparsamen Energieverbrauch während des Weiterkochens. Ferner enthalten Elektroherde noch einen Brat- und Backraum und bei modernen Typen auch Regeleinrichtungen zum Konstanthalten der Temperatur im Backraum und zur Anpassung der Kochplattentemperatur an den Anheiz- und Kochvorgang, eine Zeitschaltuhr sowie Einrichtungen zum automatischen Säubern von Brat- und Backresten. Auch *Grillgeräte* und *Wärmeplatten* zählen zu den Wärmegeräten.

Elektrische Heißwasserbereiter arbeiten automatisch und werden als Wandgeräte für 5 bis 125 l Inhalt und 0,5 bis 7,5 kW Leistungsaufnahme gebaut. Bei den Heißwasserbereitern in Niederdruckausführung liegt der Druck im Behälter unter dem der Wasserleitung, während Hochdruckspeicher mit 0,6 MPa Überdruck arbeiten.

Heizkissen. Elektrische *Wärmekissen* und *Fußmatten* brauchen wegen ihrer brennbaren Stoffhülle eine zuverlässige Temperaturbegrenzung. Heizkissen mit Stufenschalter haben 2 Heizleiter, die so schaltbar sind, daß die Heizleistung im Verhältnis 1:2:4 gesteigert werden kann. Ein Bimetallauslöser schaltet das Gerät bei zu hoher Erwärmung ab. Beim *Sicherheitskissen* mit Temperaturregelung nimmt ein Heizleiter stets die gleiche Leistung auf. Eine Zusatzheizung läßt sich in 3 Stufen einstellen und wird von einem Bimetallregler überwacht. Je nach der

gewählten Heizstufe schaltet sich das Kissen bei einer festgelegten Temperatur selbsttätig ab und bei Abkühlung wieder ein.
Bügeleisen haben meist Glimmerheizkörper, bei denen der Heizleiter zwischen Sohle und Druckplatte in Glimmer eingebettet ist. Die Leistungsaufnahme beträgt 450 bis 1 500 W. Damit keine Überhitzung auftritt, die Stoffschaden oder Brand verursachen kann, sind moderne Bugeleisen mit einem Temperaturregler versehen (Reglerbügeleisen). Ein drehbarer Schaltgriff ermöglicht das Einstellen verschiedener Bügeltemperaturen, die von einem Regler innerhalb eines bestimmten Bereichs gehalten werden.
Elektrische Raumheizungen werden in 15. 9.1. behandelt.
Elektrische Kühlanlagen werden in 2.7.2. behandelt.
Elektrische Beleuchtungstechnik. Die Beleuchtungstechnik hat die Aufgabe, gute Allgemeinbeleuchtung und genügend hohe Beleuchtungsstärken an den Arbeitsplätzen zu schaffen, wobei die *Beleuchtungsstärke* gleich dem von der Lichtquelle ausgehenden *Lichtstrom* zur beleuchteten *Fläche* ist. Arbeitsproduktivität und Ermüdung hängen außerdem von der Licht- und Raumfarbe, der Blendungsfreiheit und dem Behaglichkeitseindruck der Beleuchtung ab. Durch hohe Temperatur oder durch Stöße schnellfliegender Elektronen oder Ionen werden die Atome zur Lichtaussendung angeregt. Man unterscheidet deshalb *Temperaturstrahler*, z. B. Glühfaden- und Bogenlampen, und *Kaltstrahler*, z. B. Gasentladungslampen und Leuchtdioden.
Glühlampen. In einem evakuierten oder gasgefüllten Glaskolben wird ein Draht durch die Stromwärme so hoch erhitzt, daß er Licht aussendet. Da die Lichtausbeute mit der Temperatur stark ansteigt, muß ein Werkstoff hoher Temperaturbeständigkeit gewählt werden. Man bevorzugt Wolfram, das bis 2 300 °C erwärmt werden kann, ohne schnell zu verdampfen, vor allem, wenn durch eine Edelgasfüllung aus Argon oder Krypton mit 10 % Stickstoff und einem Druck von ≈ 0,1 MPa die Verdampfungsgeschwindigkeit weiter herabgesetzt wird. Durch Halogenzusätze (*Halogenglühlampen*), meist Brom, erreicht man, daß das verdampfende Wolfram wieder zum Glühdraht zurückgeführt wird, dadurch keine Schwärzung des Kolbens auftritt und die Lebensdauer der Lampe wesentlich erhöht wird. Einfache oder doppelte Wendelung des Glühdrahts verringert die Wärmeabgabe und erhöht die Leuchtdichte. Leistungsaufnahme (15 bis 10^4 W, max. 50 kW) und Betriebsspannung sind auf dem Sockel oder dem Glaskolben angegeben. Bis 200 W werden Glühlampen auch innenmattiert, d. h. blendungsfrei, hergestellt. *Opallampen* (40 bis 500 W) sind blendungsfreie Sonderlampen für fotografische Zwecke. Sonderlampen sind weiterhin Kraftfahrzeuglampen, Zwerglampen für Taschenlam-

pen, elektronische Geräte, Spielzeug u. a. Glühlampen werden z. T. auch nach Sockelausführung, z. B. Zwerglampe, Soffitte, oder nach Kolbenform, z. B. Kerzen-, Tropfenlampe, bezeichnet.
Gasentladungslampen bestehen meist aus einem gas- oder dampfgefüllten Glas- oder Quarzgefäß, in das 2 Metallelektroden eingeschmolzen sind. Die selbständige Gasentladung setzt ein, wenn die Spannung einen bestimmten, von Druck und Art der Füllung wie auch vom Elektrodenabstand und vom Katodenmaterial abhängigen Wert, die Zündspannung, überschreitet. Bei der *Glimmentladung*, die sich bei niedrigem Druck, kleiner Stromstärke und geringer Katodentemperatur (*Kaltkatode*) bildet, werden die zu den Elektroden abfließenden Ladungsträger – Elektronen oder negative Ionen (*Anionen*) zur Anode und positive Ionen (*Kationen*) zur Katode – durch *Stoßionisation* im Gasraum nachgeliefert. Bei der *Bogenentladung*, die bei höherem Druck und großer Stromstärke einsetzt, entstehen die freien Ladungsträger durch thermische Ionisation des Gases und durch thermische Elektronenemission der durch den Stromdurchgang hocherhitzten Katodenoberfläche (*Glühkatode*). Durch Elektronenstöße bzw. thermische Bewegung der Ladungsträger werden die Gasatome zum Leuchten gebracht und senden bei niedrigem Druck Licht bestimmter Wellenlänge bzw. Farbe, bei höherem Druck alle Wellenlängen und damit das weiße, kontinuierliche Spektrum aus. Die Betriebsspannung einer Entladungsstrecke, die *Brennspannung*, ist beträchtlich kleiner als die Zündspannung und nimmt mit wachsender Stromstärke ab. Um ein unzulässiges Ansteigen der Stromstärke bis zu einem Kurzschluß zu verhindern, müssen Gasentladungslampen mit einem Vorwiderstand – der in der Lampe selbst untergebracht sein kann – bzw. bei Wechselstrom zur Vermeidung von Wärmeverlusten mit einer Vorschaltdrossel betrieben werden.
Glimmlampen sind mit einem Edelgasgemisch aus 75 % Neon und 25 % Helium gefüllt. Sie werden für Notbeleuchtungen, Signalanlagen sowie zur Kontrolle und Anzeige elektrischer Betriebszustände verwendet.
Bogenlampen mit Elektroden aus Kohle, zwischen denen – meist frei in Luft – ein Lichtbogen brennt, werden in Großprojektoren, Scheinwerfern, Kopier- und Lichtpausgeräten verwendet, inzwischen aber – vor allem wegen der Brandgefahr und umständlichen Kohlenachstellung und aufwendigen Wartung – durch andere Lichtquellen, z. B. Xenonlampen, abgelöst.
Leuchtstoffröhren, auch Leucht-, Neon- und Hochspannungsröhren genannt, sind mit Neon, Helium o. a. Edelgasen gefüllt, arbeiten bei hoher Spannung und werden für Leuchtreklamen genutzt, da sie beliebige Form haben können.

Metalldampflampen enthalten eine geringe Menge Quecksilber, Natrium oder ein anderes leicht verdampfendes Metall und eine Edelgasfüllung von einigen Millibar, die die Zündung bei Raumtemperatur ermöglicht. Nach Verdampfen des Metalls senden die Dämpfe eine für das betreffende Metall charakteristische Farbe aus.

Bei *Leuchtstoff-* oder *Niederspannungslampen* (Abb. 11.3.3-3) ist die Entladung nicht sichtbar, sondern wird erst an einer *Leuchtstoff-* bzw. *Lumineszenzschicht*, z. B. Kalziumborat für rötliches, Zinksilikat für grünes oder gelbes, Kalziumwolframat für blaues und Kalziummolybdat für bläulichweißes Licht, an der Innenwand des Glasrohrs in sichtbares Licht umgewandelt. Da Leuchtstofflampen weniger Wärmeverluste als Glühlampen und eine drei- bis viermal größere Lichtausbeute aufweisen, setzen sie sich als Arbeitsplatz- und Raumbeleuchtung immer mehr durch. Durch Kombinieren mehrerer Leuchtstoffe wird eine tageslichtähnliche oder psychologisch günstige Lichtfarbe angestrebt.

Quecksilberdampflampen. Je nach Dampfdruck unterscheidet man Niederdruck- (10 kPa), Hochdruck- (0,1 bis 1 MPa) und Höchstdrucklampen (1 bis 10 MPa). Sie senden nach der Zündung und dem Verdampfen des Metalls UV-Strahlen aus. *Quecksilber-Niederdrucklampen* werden deshalb als Entkeimungslampen und zur Ozonbildung in Lebensmittelbetrieben, Krankenhäusern und Klimaanlagen verwendet. Bei den *Quecksilber-Hochdrucklampen* (*HQL*, Abb. 11.3.3-4) wird das Entladungsrohr, der Quarzglasbrenner, von einem zweiten Glas- oder Quarzglaskolben umgeben, der auch den Vorwiderstand enthält. Sie haben ein blaugrünes Licht und werden zur Straßen- und Werkhallenbeleuchtung eingesetzt, mit Quarzglaskolben auch für Bestrahlungs-, Lichtpaus- und Reproduktionszwecke. *Quecksilber-Höchstdrucklampen* werden wegen ihrer hohen Leuchtdichte besonders für optische Zwecke, z. B. Kinoprojektoren (vgl. 12.3.3.), verwendet.

Natriumdampflampen senden ein sehr intensives, aber monochromatisches Licht aus und werden deshalb dort eingesetzt, wo Wert auf hohe Sehschärfe und guten Kontrast gelegt wird und die rötliche Lichtfarbe untergeordnete Bedeutung hat, z. B. an verkehrsreichen Straßenkreuzungen, Baustellen u. a.

Edelgas-Hochdrucklampen. Ihr wichtigster Vertreter ist die *Xenonlampe*, die wegen ihres neutral weißen Lichts, das dem Tageslicht nahe kommt, zur Bühnenbeleuchtung, bei der Farbmusterung in der Textilindustrie, aber auch zur Beleuchtung von Stadtplätzen und hohen Hallen, zur Gebäudeanstrahlung (Lichtarchitektur) u. ä. verwendet wird. Neben diesen mit Hochdruck

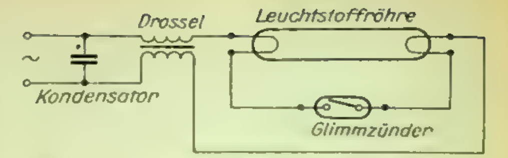


Abb. 11.3.3-3 Schaltung einer Leuchtstofflampe

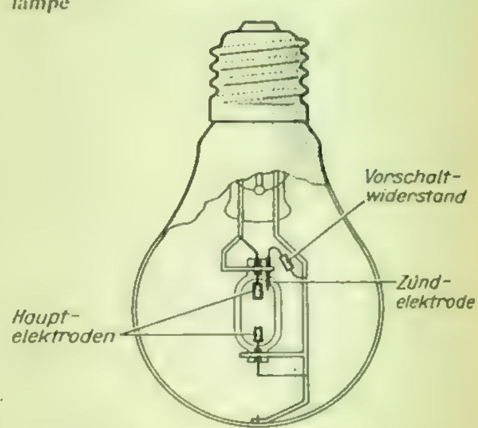


Abb. 11.3.3-4 Quecksilber-Hochdrucklampe (HQL)

arbeitenden *Xenon-Langbogenlampen* (10 kPa, Elektrodenabstand > 1 m) gibt es *Höchstdruck-Kurzbogenlampen* (1 bis 2 MPa, Elektrodenabstand wenige Millimeter) mit einer punktförmigen Gasentladung hoher Leuchtdichte, die man z. B. in Kinoprojektoren – besonders für Farbfilme – einsetzt. Durch kurzzeitige Spannungserhöhung läßt sich die Lichtausbeute der Xenonlampe um ein Vielfaches steigern, wodurch sie sich besonders als *Blitzlichtlampe* in der Fototechnik eignet. Die zum Zünden erforderliche Spannung von 2 500 V wird einem aufgeladenen Kondensator entnommen. Die Lampe hat eine Lebensdauer bis zu 50 000 Zündungen.

Kondensatorlampen wandeln elektrische Energie durch den Elektrolumineszenzeffekt direkt in Licht um. Da die Lichterzeugung in einer sehr dünnen Flächenschicht erfolgt, wird eine gleichmäßige, flächenhafte Lichtausstrahlung bei geringer Leistungsaufnahme und Erwärmung erzielt, die zur Beleuchtung von Meßeinrichtungen, Skalen, Bedienungspulten angewendet werden kann.

11.3.4. Schutzbestimmungen und Schutzmaßnahmen

Die in der Elektrotechnik auftretenden großen Energien können bei Störungen oder unsachgemäßer Bedienung elektrischer Anlagen erhebliche Schäden hervorrufen. Vorschriften und Bedienungsanweisungen für den Bau und den

Betrieb elektrischer Anlagen gewährleisten größtmöglichen Schutz der in diesem Bereich arbeitenden Werktätigen. Bereits bei einer Stromstärke > 0,025 A im menschlichen Körper besteht Lebensgefahr. Die auftretende Stromstärke hängt von den jeweiligen Verhältnissen, von der Art der Berührung spannungsführender Teile und vom Hautübergangswiderstand ab, so daß eine Spannungsgrenze nicht exakt festgelegt werden kann; unter ungünstigen Verhältnissen liegt sie schon bei 65 V. Um bei Störungen, z. B. Beschädigung von Isolationen in elektrischen Geräten, eine zu hohe *Berührungsspannung* zu vermeiden, sind verschiedene *Schutzsysteme* eingeführt worden, von denen die beiden wichtigsten angeführt werden sollen.

Schutzisolierung. Bei *schutzisolierten* Geräten (Symbol ⧈) wird die Isolierung verstärkt ausgeführt, oder alle Gehäuseteile werden aus Isolierstoffen gefertigt.

Nullung. Bei Geräten, die nicht schutzisoliert ausgeführt werden können, bietet die sehr häufige Nullung meist ausreichenden Schutz. Als *Schutzleiter* dient der Nulleiter, der vom Drehstromnetz (Vierleiternetz) mitgeführt wird und bei Anschluß ortsveränderlicher Geräte über den Schutzkontakt (*Schutzkontakt-, Schukosteckdose*) und über die Geräteleitung an die metallischen Gehäuseteile des Geräts angeschlossen ist. Wird die Isolierung schadhaft, so fließt über den Nulleiter ein kräftiger Kurzschlußstrom, so daß die Sicherung anspricht und den Stromkreis abschaltet. Der Nulleiter wird in der Nähe des Elektroenergieerzeugers, am Transformator, und bei größeren Niederspannungsnetzen in Verbrauchernähe geerdet, z. B. auch mit den (metallischen) Wasserleitungen verbunden, um einen möglichst geringen Widerstand des Kurzschlußkreises bei Schäden zu erreichen.

11.4. Informationstechnik

Information ist neben Stoff und Energie der dritte Hauptgegenstand technischen Interesses. Unter dem Oberbegriff Informationstechnik lassen sich alle technischen Disziplinen vereinen, die sich mit Gewinnung, Übertragung und Verarbeitung von Information (meist mit elektrischen bzw. elektronischen Mitteln) befassen. Man unterscheidet somit Informationsgewinnung, -übertragung und -verarbeitung.

Informationsgewinnung ist die Feststellung der Merkmale von Objekten und deren Bewertung. Sie bedient sich dabei hauptsächlich der Meßtechnik (vgl. 13.1.12.), aber auch der Auswertung von Daten und gespeicherter o. a. Informationen. Der Meßfühler, der Speicher oder z. B. der Mensch werden dabei zur Informationsquelle (vgl. 11.4.1.).

Informationsübertragung erfolgt meist mit elektrischen Mitteln. Soweit dabei Nachrichten über-

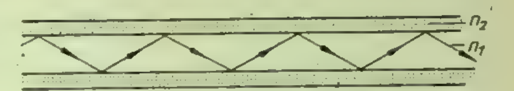


Abb. 11.4.0-1 Lichtleiter, bestehend aus einem Kern mit dem Brechungsindex n_1 und einem Mantel mit n_2. Wenn $n_2 > n_1$ ist, wird ein Lichtstrahl im Lichtleiter immer wieder totalreflektiert

tragen werden, spricht man von *Nachrichtentechnik*. Man bedient sich dabei entweder der *leitungsgebundenen Übertragungstechnik* (vgl. 11.4.2.) mittels elektrischer Leiter (*drahtgebundene Übertragungstechnik*), Lichtleiter oder der leitungslosen Übertragungstechnik mittels elektromagnetischer Wellen, z. B. beim Rundfunk (vgl. 11.4.4.). *Lichtleiter* als Übertragungsmedium bilden dabei die modernste Art der Übertragung. Ihre Anwendung befindet sich jedoch noch in der Entwicklung. Man verwendet Glas- oder Plastfasern, die in Bündeln zusammengefaßt sind. In den einzelnen Fasern werden Lichtwellen bei wiederholter Totalreflexion an den Faserwänden weitergeleitet (Abb. 11.4.0-1). Es gibt auch Lichtleitfasern, bei denen ein Kern mit einem Brechungsindex n_1 von einem Mantel mit einem Brechungsindex n_2 umgeben ist. Totalreflexion und damit Weiterleitung tritt ein, wenn $n_2 < n_1$ ist. In anderen Fällen verwendet man Fasern, bei denen der Brechungsindex von innen nach außen stetig abnimmt. Man kann mit einem *Lichtleitkabel* über 10^4 Ferngespräche gleichzeitig übertragen. Lichtleitkabel mit geordneten Fasern ermöglichen die Übertragung von Bildern, wobei die Auflösung von der Anzahl der Fasern abhängt. Solche Glasfaser-(Plastfaser-) Bildübertragungskabel dienen meist der Übertragung von Bildinformationen über kurze Strecken, z. B. in der Medizin von inneren Organen nach außen.

Informationsverarbeitung umfaßt die Verarbeitung empfangener Informationen, insbesondere die Verarbeitung von Daten (vgl. 14.3.). Außerdem rechnet man hierzu im weiteren Sinn auch die gesamte Steuerungstechnik (vgl. 14.2.).

11.4.1. Information und Signal

Information und Signal stehen im Verhältnis von Inhalt und Form zueinander, wobei die technischen Realisierungen durch stark differenzierte Formen, jedoch nur wenige inhaltsmäßige Zielstellungen zu charakterisieren sind (Gewinnung, Übertragung, Verarbeitung).

Information. Allgemein ist Information Wissenszuwachs über einen interessierenden Sachverhalt, ein Vorgang, der sich zwischen einer ausgebenden Stelle, der *Informationsquelle*, und

einer empfangenden Stelle, der *Informationssenke*, abspielt. Quelle und Senke können sowohl Menschen als auch technische Einrichtungen sein. Die Aspekte der Bedeutung und des Zwecks (semantischer und teleologischer Aspekt) werden im technischen Bereich vernachlässigt. Eine Mitteilung über einen Sachverhalt stellt nur in dem Maße Information dar, in dem sie für den Empfänger Wissenszuwachs, d. h. Abbau von Unsicherheit, bedeutet. Somit existiert Information nicht unabhängig vom Empfänger, denn unterschiedliche Vorkenntnisse verschiedener Empfänger bedingen bei derselben Mitteilung unterschiedlich viel Information. In der Praxis wird oft von Information schlechthin gesprochen, dann ist stillschweigend ein fiktiver Empfänger mit definiertem Zustand, z. B. ohne Vorkenntnisse, vorausgesetzt worden. Der Begriff Nachricht wird oft synonym mit Information verwendet, teilweise auch für menschliche Empfänger reserviert; in der Regel bedeutet er die Mitteilung an sich. Information ist an vereinbarte *Zeichen* (*Symbole*) geknüpft. Diese Zeichenvereinbarungen drücken zugleich eine Abgrenzung über die interessierenden Gegenstände aus, über die informiert werden kann. Eine weitgefaßte Abgrenzung liegt bei der menschlichen Sprache vor im Gegensatz zu den nur 2 Zeichen, die bei der Überwachung einer Anlage erforderlich sind, wenn nur die beiden Aussagen „betriebsklar" und „gestört" verlangt werden. Aber auch Meßobjekte sind Informationsquellen, die meist zu „Aussagen" angeregt werden müssen, wobei die Information an vereinbarte Maßsysteme geknüpft ist.

Störungen sind Beeinträchtigungen des richtigen Empfangs von Information. Sie sind immer vorhanden und bedeuten Informationsverlust, so daß absolut sichere Kenntnis über einen Sachverhalt ein nur theoretisch erreichbarer Grenzfall ist. Die Zielstellung in der Praxis allerdings ist in der Regel aus technisch-ökonomischen Gründen sowieso nur hinreichende (nicht maximale) Sicherheit. Störungen wirken sich in der Vortäuschung von Zeichen bzw. im Empfang falscher Zeichen aus. Nur Verfälschungen mit Zufälligkeitscharakter sind echte Störungen, denn determinierte, d. h. vorhersagbare Einflüsse, können kompensiert werden. Die Verminderung von Störungen bzw. deren Auswirkungen ist eines der Hauptprobleme in der Informationstechnik. Sie kostet technischen Aufwand, der sich in vielerlei Gestalt äußern kann (z. B. Sendeleistung, Filter, Leitungsquerschnitt, Abschirmung usw.).

Informationstheorie. Im engeren technischen Sinne ist die Informationstheorie abstrakte Basis der Informationstechnik, die fundamentale Begriffe definiert, deren quantitative Zusammenhänge untersucht sowie theoretische Möglichkeiten und Leistungsgrenzen der Technik angibt. Obwohl sie über technische Realisierungen nichts aussagt, entwickelten sich dennoch auf ihrer Grundlage praktische Lösungen der Informationstechnik. Mathematisch ist sie ein Zweig der Wahrscheinlichkeitstheorie. Die von einer (diskreten) Informationsquelle emittierten Symbole werden als Ereignisse im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie aufgefaßt, und die Quelle wird durch statistische Parameter beschrieben. Je wahrscheinlicher ein Symbol dem Empfänger erscheint, desto kleiner ist der Wissenszuwachs und damit der *Informationsinhalt*. Als Einheit des Informationsinhalts dient die Binärentscheidung, abgekürzt *Bit* (von engl. *bi*nary digi*t*), d. h. die Entscheidung zwischen 2 Zuständen. Jede Information ist (nach entsprechender Vereinbarung, d. h. Codierung) durch eine Folge von Binärentscheidungen ausdrückbar. *Redundanz* ist ein Maß für die Eigenschaft einer Quelle, mit den emittierten Symbolen im Mittel nicht den maximal möglichen Informationsinhalt zu transportieren. Der *Informationskanal* ist das verbindende Element zwischen Quelle und Senke, ihm werden die Störungen zugeschrieben und daraus eine Kanalkapazität (gemessen in Bit/Zeiteinheit) zur Kennzeichnung der Übertragungseigenschaft ermittelt. Durch *Codierung*, d. h. eindeutige Zuordnung von Symbolen zueinander, können 2 wichtige Aufgaben gelöst werden:

1. bessere Ausnutzung von Symbolen einer Quelle durch Verminderung von Redundanz, sog. *Quellencodierung*;
2. bessere Ausnutzung eines Kanals durch gezielte Zuführung von Redundanz, sog. *Kanalcodierung*.

Signal. Information ist an physikalische Träger gebunden. In der elektrischen Informationstechnik sind es vorzugsweise elektrische, magnetische oder elektromagnetische Träger, die zeitlich oder räumlich veränderlich sind und so Symbole oder ein Symbolkontinuum darstellen können, z. B. die Morsetastung oder Sprachmodulation einer elektromagnetischen Strahlung, Magnetbandaufzeichnung von Daten oder Musik. Signale sind die zeit- oder ortsabhängigen Größen physikalischer Träger, die charakteristische unterscheidbare Verläufe (Symbole, Zeichen) bilden und somit Information beinhalten können, wobei der spezielle physikalische Träger (Magnetisierung, Spannung, Lichtstrahlungsintensität usw.) nicht interessiert. Mathematisch modelliert sind sie Funktionen, d. h. eindeutige Zuordnungen von Werten zu einem Argument, der unabhängigen Variablen. Mit der mathematischen Modellierung ist eine Idealisierung verbunden. In diesem Sinne heißen Signale *wertkontinuierlich*, wenn die Funktionswerte beliebige Zahlenwerte annehmen können und *wertdiskret*, wenn nur bestimmte Zahlenwerte zugelassen sind. Entsprechend unterscheidet man hinsichtlich der unabhängigen Variablen *argumentkontinuierliche* und *argumentdiskrete*

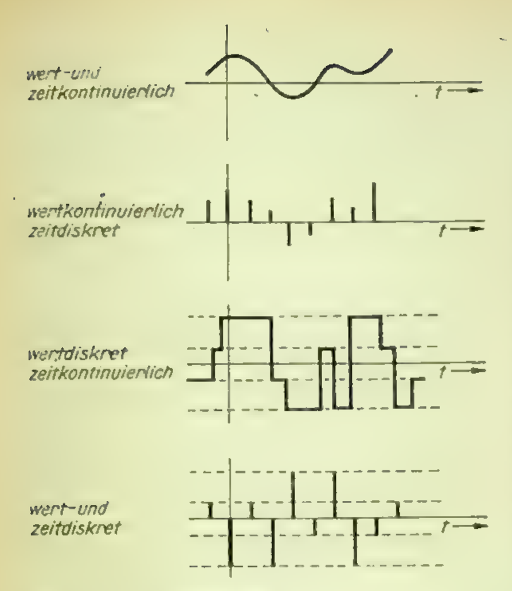


Abb. 11.4.1-1 Signalarten

Signale. In Abb. 11.4.1-1 sind die 4 charakteristischen Signalarten als Zeitfunktionen skizziert. Kontinuierliche Größen können näherungsweise durch diskrete dargestellt werden. Man bezeichnet diesen Vorgang als *Quantisierung*. Ein so entstandenes wertdiskretes Signal heißt *wertquantisiert* oder quantisiert schlechthin, das durch Abtastung (Zeitquantisierung) entstandene zeitdiskrete Signal heißt *zeitquantisiert*. Ein weiterer Sonderfall des wertdiskreten Signals ist das *digitale*, das Codeworte darstellt. Das meistverwendete digitale Signal ist das *Binärsignal*, bei dem nur 2 diskrete Funktionswerte zugelassen sind, z. B. ± 1. Die Bezeichnungen sind nicht einheitlich, so werden wertkontinuierliche Signale auch als *analoge*, wertdiskrete als digitale Signale bezeichnet. Ein Signal ist durch mehrere Parameter gekennzeichnet, z. B. Amplitude, Nullphasenwinkel, Frequenz. Information kann von einem Signal nur dann übertragen werden, wenn mindestens ein Parameter eine zeit- bzw. ortsabhängige Zufallsgröße ist. Dieser eigentliche Träger der Information heißt *Informationsparameter* (vgl. Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation). Eine zeitabhängige Zufallsfunktion wird *stochastisch* genannt. Im Gegensatz dazu steht das *determinierte Signal*, dessen Verlauf vollständig festgelegt ist. Man unterscheidet *periodische* (z. B. die Sinusfunktion) und *aperiodische* (z. B. den Rechteckimpuls) determinierte Signale. Obwohl das determinierte Signal keine Information übertragen kann, spielt es in der Informationstechnik, z. B. bei der mathematischen Beschreibung von technischen Einrichtungen (Systemen), als Aufbausignal (Elementarsignal) für stochastische Signale oder als Bezugssignal etwa zur Synchronisierung, eine Rolle.

11.4.2. Telefonie

Die verbreitetste Art eines unmittelbaren Informationsaustauschs zwischen räumlich getrennten Personen (Telekommunikation) ist die Telefonie, das *Fernsprechen*. Durch den gegenüber anderen Telekommunikationsmitteln niedrigen Preis, den geringen Umfang der Teilnehmereinrichtungen und die einfache Bedienung ist der Fernsprecher auf allen Gebieten zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel geworden. Das öffentliche Weltfernsprechnetz umfaßt ≈ 5 · 10^8 Fernsprecher.

Fernsprecher (*Fernsprechapparat*, Abb. 11.4.2-1a). Ein Mikrofon *M* wandelt die akustischen Schwingungen im Sprachfrequenzbereich von 300 bis 3400 Hz in elektrische Schwingungen um. In einem Fernhörer *F* erfolgt die Rückwandlung. Beim Kohlemikrofon (Abb. 11.4.2-1c) be-

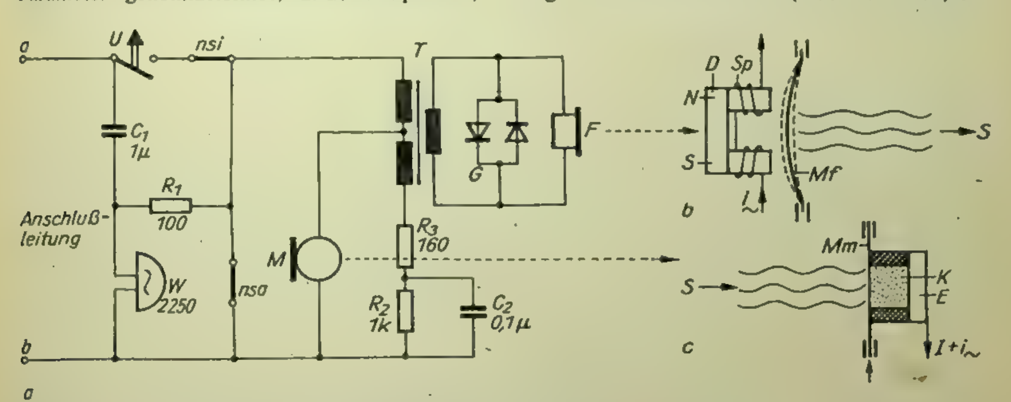


***Abb. 11.4.2-1** a vereinfachte Schaltung des Wählfernsprechers „Variant N", b Aufbauprinzip eines Fernhörers und c eines Kohlemikrofons*

findet sich zwischen Membran *Mm* und Gegenelektrode *E* Kohlegrieß *K*, der beim Zusammendrücken geringeren, beim Lockern größeren Widerstand aufweist, so daß der Strom *I* abhängig vom Augenblickswert des Schalldrucks der Sprachwellen *S* um *i* verändert wird. Bei der üblichen Ausführung des Fernhörers (Abb. 11.4.2-1b) wird eine ferromagnetische Membran *Mf* durch das Feld eines Dauermagneten *D* vorgespannt. Auf seinen Polschuhen befinden sich Spulen *Sp*, die von dem sich ändernden Strom *i* durchflossen werden. Durch Stärkung und Schwächung des in Ruhe vorhandenen Dauermagnetflusses durch das Magnetfeld des Stromes wird die Membran bewegt. Ein Gehörschutz *G* schließt höhere Spannungen am Fernhörer kurz. Besser, aber auch teurer, sind dynamische und piezoelektrische Mikrofone (vgl. 11.4.8.) und Fernhörer. Damit die eigene Sprache im Fernhörer *F* nur leise gehört wird, ist eine Rückhördämpfungsschaltung mit Transformator *T*, Widerständen *R*2, *R*3 und Kondensator *C*2 eingefügt. Mikrofon und Fernhörer sind konstruktiv im Handapparat zusammengefaßt, der beim Abheben durch den Kontakt *U* den Gleichstromkreis zur Vermittlungsstelle schließt. Der Verbindungsaufbau erfolgt gemäß der Anzahl der Stromunterbrechungen des Nummernschalterimpulskontakts *nsi*, die gleich der gewählten Ziffer ist (Ausnahme: 10 bei Ziffer 0). Mit dem *nsa*-Kontakt werden bei Impulsgabe *M* und *F* kurzgeschlossen. Bei Mehrfrequenzkodewahl (*MFC*) mittels Zifferntasten werden je Ziffer 2 zugehörige von 8 erzeugbaren Frequenzen zu einer elektronisch gesteuerten Vermittlungsstelle übertragen. Gegenüber dieser echten *Tastenwahl* wird bei der *Quasitastenwahl* nach Tastendruck die Ziffer in Form von Stromunterbrechungen wie beim Nummernschalter abgegeben. Ein Wechselstromwecker *W* signalisiert ankommende Verbindungen.

Struktur des automatisierten Fernsprechnetzes. Die Verbindung zwischen 2 Fernsprechern nach den Wünschen des Benutzers wird in allen Ländern der Welt im Bereich eines Ortsnetzes fast nur noch automatisch und zwischen den Ortsnetzen (nationales Fernnetz) zu einem großen Teil automatisch aufgebaut. Der internationale Selbstwählfernverkehr ist in den einzelnen Ländern in verschiedenem Umfang realisiert. Die Nebenstellen erhalten neben den abgehenden Verbindungen meist auch die vom Orts- und Fernnetz ankommenden ohne Vermittlung des Bedienungspersonals der Nebenstellenanlage (Durchwahl). Vor der Rufnummer einer Nebenstelle für Durchwahl muß z. T. noch die Ortsnetz- und Landeskennzahl gewählt werden, wobei die maximale Anzahl der Ziffern nicht größer als 12 sein soll. Bei abgehendem Verkehr ist durch Verkehrsausscheidungsziffern, z. B. 0, der Übergang in das jeweils höhere Netz möglich. In einer nationalen Fernvermittlungsstelle müssen oft nicht nur eine, sondern mehrere Ziffern verarbeitet werden, so daß Ortsnetzkennzahlen mehr als 3 Ziffern haben können. Bei benachbarten Vermittlungsstellen werden verkürzte Wege benutzt.

Leitungsgebundene Übertragung elektrischer Signale. *Raumteilung (-multiplex)*. In Ortsnetzen und Nebenstellenanlagen, früher auch im Fernnetz, ist für jeden Übertragungskanal *ÜK* ein galvanischer Weg in Form von 2 Kabeladern (seltener 2 Freileitungsdrähten) vorhanden. Im Fernnetz wird z. T. ein Vierdrahtbetrieb durchgeführt. Hin- und Rückrichtung werden getrennt und können elektronisch ohne gegenseitige Beeinflussung verstärkt werden. Die Kosten der Leitungen sind erheblich, so daß eine Mehrfachausnutzung erfolgen muß.

Zweieranschlüsse durch Polaritätswechsel. In Ortsnetzen werden Zweieranschlüsse bei geringem Mehraufwand in der Vermittlungsstelle (getrennte Gesprächszähler, vertauschbare Polarität) gebildet, an die über eine Anschlußleitung 2 Fernsprecher mit unterschiedlichen Rufnummern angeschlossen werden können. Eine zusätzliche elektronische Entkopplungsschaltung in den Fernsprechern garantiert, daß jeweils nur einer der beiden Fernsprecher in Betrieb sein kann und ein Mithören am anderen Fernsprecher nicht möglich ist.

Frequenzteilung (-multiplex). In der Fernebene werden die Nutzsignale der Übertragungskanäle *ÜK* mit unterschiedlichen Trägerfrequenzen moduliert. Der verwendete Ringmodulator unterdrückt den Träger beim modulierten Signal. Durch elektrische Filter aus Spulen und Kondensatoren oder durch elektromechanische Filter mit einem mechanischen Schwinger wird ein Seitenband unterdrückt. Damit ist die benötigte Bandbreite für einen Übertragungskanal nur etwas größer als die niederfrequente, z. B. 4 kHz bei Fernsprechen. Je nach Ausführung einer Leitung (symmetrische oder koaxiale Kabel) sind 12 (Abb. 11.4.2-2) bis über 10^4 Übertragungskanäle übertragbar.

Zeitteilung (-multiplex). Im gleichen Zeitabstand werden Abtastungen der Amplitude der Signale vorgenommen (Abb. 11.4.2-3). Diese Pulsamplitudenmodulation (*PAM*) wird in den einzelnen *ÜK* in einem vorgegebenen Zeitraster (üblich 32 Zeitlagen) zeitlich versetzt vorgenommen. Da sich das PAM-Signal schlecht verzerrungsfrei übertragen läßt, wird durch Pulskodemodulation (*PCM*) ein digitales Signal gebildet. Beim Fernsprechen mit 256 zu übertragenden Amplituden-



Abb. 11.4.2-2 Frequenzteilung

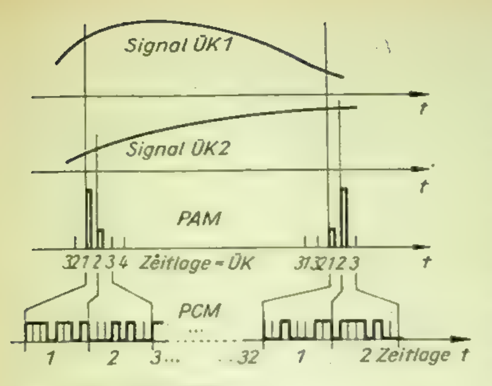


Abb. 11.4.2-3 Zeitteilung

stufen werden zur Übermittlung jedes Amplitudenwertes 8 Bit benötigt, wobei ein Bit 0,5 μs breit ist. Die Schaltungen werden mit integrierten digitalen Halbleiterbauelementen (vgl. 11.5.4.) realisiert. Dieses Verfahren ist schon für geringe Entfernungen rentabel und auch für Ortskabel geeignet. Für die Fernebene werden Systeme mit der 4- bzw. 16fachen Zeitlagenzahl verwendet. Neben den Kabelarten für Frequenzteilung sind Lichtleiter aus Glasfasern (vgl. 11.4.) geeignet.

Vermittlung von elektrischen Signalen. Die Vermittlungsstellen bzw. Zentralen enthalten als Hauptbestandteil eine Vermittlungseinrichtung, die aus einem Koppelnetz und einer Steuereinrichtung besteht. An das Koppelnetz werden die Übertragungskanäle angeschlossen und nach Bedarf für die Dauer der Informationsübertragung zusammengeschaltet. Das Koppelnetz besteht aus *Koppelelementen*, die durch die Steuereinrichtung entsprechend der Wahlinformation des Anrufenden und der noch unbelegten Verbindungswege im Koppelnetz betätigt werden.

Als Koppelelemente wurden bisher in der DDR Schrittschaltwähler (*Dreh-* und *Hebdrehwähler*) eingesetzt. Sie können synchron mit den Wählimpulsen des Nummernschalters durch eine Steuereinrichtung aus Relais eingestellt werden (direkte Steuerung). Ein Hauptnachteil des Hebdrehwählers ist, daß er nur 3 Adern über unedle Kontakte (Messing, Bronze u. a.) durchschaltet. Derzeitig werden in der DDR überwiegend *Koordinatenschalter* (Abb. 11.4.2-4, Tafel 43) als Koppelelemente gefertigt. Durch Erregung eines Stangenmagneten *SM* wird eine Stange *S* mit ihren Markierfedern *M* und durch nachfolgende Erregung eines Brückenmagneten *BM* ein Brückenanker *A* betätigt. Dabei wird über die nach oben oder unten ausgelenkte Markierfeder ein entsprechender Steg mit mehreren Edelmetallkontakten (bis 12) des Kontaktsatzes *K* nach links an die Kontaktdrähte *D* gedrückt. Ein Koordinatenschalter hat vielfach 100 solcher Kontaktsätze. Die Steuereinrichtung, meist mit Relais, muß erst die Impulse des Nummernschalters speichern (indirekte Steuerung) und ermittelt hieraus die Nummer des Stangen- und Brückenmagneten eines oder mehrerer Koordinatenschalter eines freien Weges.

Als schnelle Koppelelemente eignen sich *Schutzgaskontakte*. Dabei berühren sich 2 in ein Glasröhrchen eingeschmolzene ferromagnetische Zungen, sobald sie sich im Magnetfeld befinden. Das Koppelnetz besteht aus matrizenförmig geschalteten Anordnungen solcher Kontakte einschließlich ihrer Magnetspulen. Eine Zusammenarbeit mit elektronischen Steuereinrichtungen ist zweckmäßig (*Quasielektronik*). Es kann eine verdrahtete Steuerlogik oder vorzugsweise ein Vermittlungsrechner, bei kleinen Einrichtungen ein Mikrorechner, eingesetzt werden. Ähnlich werden auch digital arbeitende integrierte Halbleiterkoppelelemente gesteuert, die unmittelbar zeitgeteilte PCM-Übertragungskanäle vermitteln. Durch schnell veränderbare Speicherinhalte und Spezialprogramme bieten Rechner neue Möglichkeiten (Leistungsmerkmale) für Benutzer und Betreiber solcher Anlagen, die vom automatischen Umlenken seiner Anrufe auf eine andere Rufnummer durch den Teilnehmer selbst bis zur automatischen Gebührenabrechnung und Fehlereingrenzung reichen.

11.4.3. Telegrafie, Fernschreiber und Datenfernübertragung

Bei der *Telegrafie* werden dem Empfänger Informationen in grafischer Form ausgegeben. Es ist möglich, die beim Sender vorliegende grafische Vorlage insgesamt (*Faksimiletelegrafie*) oder bei Text die Buchstaben einzeln nacheinander (*Buchstabentelegrafie*) elektrisch zum Empfänger zu übermitteln.

Faksimiletelegrafie (*Fernkopieren*). Das Prinzip ist die punktweise Übertragung der Vorlage beim

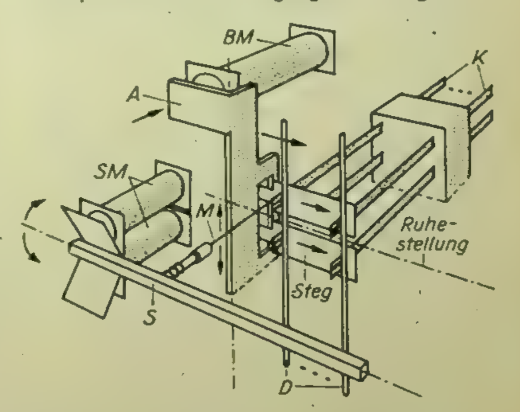


Abb. 11.4.2-4 Prinzip eines Koordinatenschalters

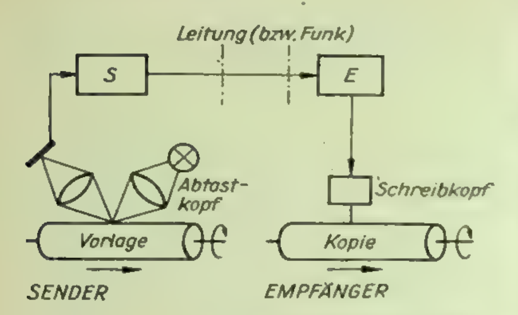


Abb. 11.4.3-1 Prinzip der Faksimiletelegrafie

Sender mittels elektrischer Signale zur Kopie beim Empfänger. Ein fotoelektrischer Abtastkopf (Abb. 11.4.3-1) wandelt die Helligkeit eines Punkts der Vorlage in einen elektrischen Wert um. Bei Schwarzweißgeräten werden Zwischenstufen nur als Schwarz oder Weiß, bei Halbtongeräten zur *Bildtelegrafie* dagegen kontinuierlich bzw. in festgelegte Stufen (quantisiert) eingeordnet und als elektrische Signale durch die Sendeeinrichtung *S* vorzugsweise über Leitungen zur Empfangseinrichtung *E* übertragen. Dort wird mit einem Schreibkopf mechanisch, meist durch Helligkeitssteuerung, die Punktinformation abgegeben. Umdrehungen und Vorschub der Sende- und Empfangstrommel sind synchron, so daß die Bildpunkte schraubenförmig abgetastet und geschrieben werden (z. B. Pressefotos mit 20 Umdrehungen je 1 mm Vorschub).

Von den Möglichkeiten der *Buchstabentelegrafie* benötigt die *Morsetelegrafie* die einfachsten Apparaturen. Von geschultem Personal (z. B. bei der Zug- und Schiffsüberwachung) werden die Kodezeichen für Buchstaben und Ziffern unmittelbar durch eine Taste elektrisch erzeugt und durch eine elektromagnetische Schreibeinrichtung, bei starken Störspannungen (z. B Funk) akustisch, empfangen.

Eine Fernschreibmaschine, kurz *Fernschreiber*, hat eine der Schreibmaschine ähnliche Tastatur zur Eingabe der Schriftzeichen. Die Kodierung der abgehenden bzw. die Dekodierung der ankommenden Fernschreibsignale nach dem Internationalen Telegrafenalphabet Nr. 2 übernimmt eine durch Elektromotor angetriebene mechanische Einrichtung, bei modernen Geräten eine elektronische Schaltung. Durch Betätigen des Nummernschalters am zugehörigen Fernschaltgerät oder der entsprechenden Zifferntasten des Fernschreibers kann sich jeder Fernschreibteilnehmer im weltweiten Telexnetz mit jedem beliebigen, auch unbesetzten, Fernschreiber verbinden und schriftliche Informationen absetzen. Das Telexnetz ist in Struktur, Vermittlung und Übertragung ähnlich dem Fernsprechnetz und umfaßt knapp 1 Mio Teilnehmer. International wird eine *Bürofernschreibmaschine* mit Groß- und Kleinbuchstaben, Tastatur und damit auch einer Bedienung praktisch wie bei einer Schreibmaschine angestrebt.

Datenfernübertragung. Der Austausch von Daten zwischen Mensch und EDVA erfolgt durch zwischen datenspezifische Ein-/Ausgabegeräte und Fernsprechnetz geschaltete *Modems* (*Modulator* und *Demodulator*) mit 200 bis 2400 bit/s oder durch Fernschreiber über das Telexnetz mit 50 bit/s. Dialoge zwischen EDVA mit 9,6 bzw. 48 kbit/s laufen über Breitbandverbindungen des Fernsprechweitverkehrsnetzes oder besondere Datenleitungen, in Zukunft mehr und mehr über gesonderte Datennetze oder das für alle Dienste geplante integrierte digitale Nachrichtennetz. Bei allen Arten der Fernübertragung von Daten muß wegen möglicher Störungen eine Kodierung erfolgen, die Redundanz enthält und Fehlererkennung bzw. -korrektur am Empfänger gestattet.

11.4.4. Hörrundfunk

Verfahren. Um Musik oder Sprache drahtlos zu den Hörrundfunkteilnehmern übertragen zu können, müssen diese im Studio in elektrische Signale umgewandelt werden. Dazu ist es erforderlich, die tonfrequenten Schwingungen einem hochfrequenten Träger zu überlagern (*Modulation*). Angewendet werden die *Amplituden-* (*AM*) und *Frequenzmodulation* (*FM*) (Abb. 11.4.4-1). Bei AM wird die Amplitude, bei FM die Frequenz des hochfrequenten Trägers im Takte der Tonfrequenz verändert. Im Kurz-, Mittel- und Langwellenbereich verwendet man AM, im UKW-Bereich FM. Bei der AM entsteht ein unteres und

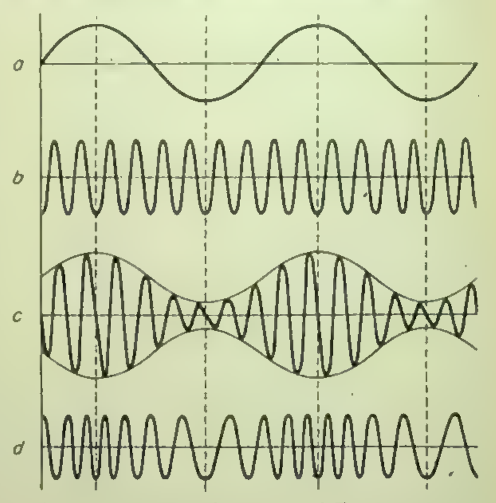


*Abb. 11.4.4-1 Amplituden- und Frequenzmodulation: **a** tonfrequente Modulationsfrequenz, **b** unmodulierte Hochfrequenz (Träger), **c** amplitudenmodulierte und **d** frequenzmodulierte hochfrequente Schwingung*

ein oberes *Seitenband*; man spricht daher von *Zweiseitenbandübertragung* (*DSB* von engl. double sideband). Bei *Einseitenbandübertragung* (*SSB* von engl. single sideband) wird nur eines dieser beiden Seitenbänder ausgestrahlt. Vorteil der SSB-Übertragung ist, daß etwa die halbe Bandbreite eingespart wird, daß man mit kleinerer Sendeleistung auskommt und daß bei Schwunderscheinungen nur geringe Verzerrungen auftreten. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand im Empfänger bei der Demodulation. Mit der Einführung der SSB-Übertragung ist wegen der hohen Kosten (derzeitige Empfänger sind dafür nicht geeignet) beim Hörrundfunk vorläufig nicht zu rechnen, jedoch wendet man dieses Verfahren schon im Amateurfunk und für kommerzielle Funkdienste an.

Bei der üblichen einkanaligen Übertragung ist beim Rundfunkteilnehmer nur eine *monofone* Wiedergabe möglich. Eine weitaus bessere Wiedergabequalität läßt sich erreichen, wenn die jedem Ohr zugeordneten Schalleindrücke durch je einen Kanal übertragen werden (*Stereofonie*). Die höhere Qualität und die notwendige Bandbreite erfordern die Anwendung im Ultrakurzwellenbereich (UKW). Die Stereoübertragung erfolgt nach dem *Pilottonverfahren*. Dabei wird das Tonsignal des zweiten Kanals einem AM-Hilfsträger (38 kHz) aufmoduliert. Ein 19-kHz-Pilotsignal sichert die einwandfreie Wiedergabe auf der Empfängerseite. Zwecks weiterer Verbesserung des Hörerlebnisses sind Übertragungsverfahren mit 4 Kanälen in Erprobung (*Quadrofonie*).

Die übertragene Tonfrequenz-Bandbreite ist mit 4,5 kHz (LW, MW, KW) und 15 kHz (UKW) und der Kanalabstand mit 9 kHz (LW, MW, KW) und 300 kHz (UKW) international festgelegt (Tab. 11.4.4-2).

Studiotechnik. Die elektro-akustischen Einrichtungen des Tonstudios ermöglichen die Umwandlung akustischer Signale in elektrische, deren Verstärkung, Regelung, Mischung, Kontrolle und gegebenenfalls auch Speicherung. Im allgemeinen ist der Studiokomplex in Aufnahme-, Regie-, Schalt- und Kontrollraum unterteilt.

Als elektro-akustische Wandler, die eine dem Schalldruck entsprechende Wechselspannung liefern, dienen *Mikrofone*. Für Studiozwecke eignen sich z. B. *dynamische* oder *Kondensatormikrofone* (vgl. 11.4.8.).

Der überwiegende Teil des Hörrundfunkprogramms wird nicht direkt gesendet (engl. life), sondern zunächst gespeichert und später abgespielt. Diese Verfahrensweise ermöglicht die Konservierung wertvoller Darbietungen sowie bessere Terminplanung für Studioräume und Künstler. Dabei haben *Schallplattenabspielgeräte* ihre frühere Bedeutung verloren. Wegen der hohen Wiedergabequalität, der einfachen Handhabung und der vielfältigen Möglichkeiten des Bandschnitts haben sich die *Magnetbandgeräte* eindeutig durchgesetzt, d. h. eine magnetische Aufzeichnung der Schallereignisse auf Tonbänder. Wegen der häufigen Cutterarbeiten an den Bändern (engl. to cut = schneiden) ist bei Studio-Magnetbandgeräten ein großer Bedienungskomfort erforderlich, verbunden mit hoher Qualität und großer Betriebssicherheit. Die Bandgeschwindigkeit dieser Geräte beträgt i. allg. 38,1 cm/s (teilweise auch 19,05 cm/s). Diese Geschwindigkeit erlaubt eine Übertragung der hohen Tonfrequenzen ohne Anhebung und damit auch geringe nichtlineare Verzerrungen, sowie einen großen Geräuschabstand. Auch das Problem der Tonhöhenschwankungen durch nicht ausreichende Konstanz der Bandgeschwindigkeit ist dadurch leichter zu beherrschen. Bei Studiogeräten wird die *Vollspuraufzeichnung* verwendet, besonders wegen der Cuttermöglichkeiten, des Geräuschabstands und der Übersprechfreiheit. Bei Musikaufnahmen werden auch häufig *Vielspur-Magnetbandgeräte* eingesetzt, wobei auf jeder Spur einzelne Stimmen und Instrumente bzw. Instrumentengruppen aufgezeichnet sind. Erst zum Schluß entsteht die vollständige Musikaufnahme. Dieses Verfahren erlaubt eine weitgehende künstlerische Gestaltung noch nach der Aufnahme und verkürzt damit die kostspielige Aufnahmezeit.

Insbesondere im Regieraum, aber auch im Kontrollraum, sind hochwertige Wiedergabeeinrichtungen erforderlich, sog. *Abhöreinrichtungen*. Das sind Lautsprecherkombinationen, bei denen die einzelnen Teilbereiche des Tonfrequenzspektrums auf verschiedene Lautsprecher verteilt werden (z. B. Tief-, Mittel-, Hochtonsystem). Um gegenüber der Originallautstärke keine zu große Abweichung zu haben (Klangbildveränderung), sind große Lautsprecherleistungen notwendig.

Für Übertragungen von den verschiedensten Stellen außerhalb eines Studios dienen *Übertragungswagen* (Ü-Wagen). Im Prinzip enthalten diese Wagen eine Ausrüstung wie ein Tonstudio, speziell für den mobilen Einsatz konstruiert. Die Ü-Wagen werden entweder an das Netz angeschlossen oder von einer Netzersatzanlage gespeist.

Übertragungstechnik. Das vom Studio abgegebene tonfrequente monofone oder stereofone Signal muß mit den Mitteln der Übertragungstechnik zum Hörrundfunksender gebracht werden.

Tab. 11.4.4-2 *Frequenzbereiche des Hörrundfunks*

Frequenzbereich	Bezeichnung
150 ... 285 kHz	Langwelle (LW)
525 ... 1605 kHz	Mittelwelle (MW)
5,95 ... 26,1 MHz	Kurzwelle (KW)
87,5 ... 100 MHz	Ultrakurzwelle (UKW)

Das dominierende Übertragungsmittel ist der *Richtfunk* (vgl. 11.4.6.). Richtfunkverbindungen haben die Aufgabe, ein bestimmtes Signal von einem Punkt zum anderen drahtlos zu übermitteln. Diese Anlagen arbeiten im Mikrowellengebiet (Frequenzbereich i. allg. 2 bis 12 GHz). Dabei wird nahezu ausschließlich mit Sichtverbindung gearbeitet, d. h. praktisch mit Entfernungen von ≈ 50 km. Die Anlagen einschließlich ihrer Nebeneinrichtungen sind vorwiegend auf *Richtfunktürmen* untergebracht. Durch Ausnutzung natürlicher Erhebungen und der Turmhöhe ist man in der Lage, nicht nur die Sichtverbindung zu garantieren, sondern auch einen durch Wegunterschied von halber Wellenlänge definierten Raum (des *Fresnel-Ellipsoid*) frei von störenden Hindernissen zu halten. Letzteres ist notwendig, um Störungen durch Schwunderscheinungen auf ein Minimum herabzudrücken. Größere Entfernungen werden durch Einfügen von *Relaisstellen* (Zwischenverstärker mit Frequenzumsetzung, Abb. 11.4.4-3) überbrückt. Die Richtfunktechnik ermöglicht sowohl monofone als auch stereofone Übertragung in höchster Qualität.

Zum Zwecke der Modulationszuführung von Sender zu Sender wird gelegentlich (als Reserveweg sogar häufiger) das Prinzip des *Ballempfangs* verwendet. Der Ballempfänger ist ein spezieller hochwertiger Empfänger, der das tonfrequente Signal von einem geeigneten Hörrundfunksender aufnimmt und dem eigenen Sender zur Verfügung stellt. Es ist auch Stereoübertragung in guter Qualität möglich. Gegenüber dem Richtfunk ist der Ballempfang weitaus billiger, dafür aber auch mehrfach belegte Rundfunkkanäle störanfälliger.

Sendetechnik. Der *Sender* erzeugt HF-Schwingungen (den sog. *Träger*), denen das zugeführte tonfrequente Signal aufmoduliert wird. Die modulierte hochfrequente Energie wird der Sendeantenne zugeführt und von ihr abgestrahlt, damit sie die Empfangsantenne des Rundfunkteilnehmers aufnehmen und dem Empfänger zuführen kann. Hörrundfunksender in LW-, MW- und KW-Bereichen sind AM-Sender und weisen im Prinzip eine untereinander ähnliche Konstruktion und Wirkungsweise auf (Abb. 11.4.4-4). Die Senderleistungen liegen zwischen 1 und 2000 kW. Die Hörrundfunksender im UKW-Bereich (auch *UKW-Sender* genannt) sind FM-Sender. Als Senderleistung sind 1 bis 10 kW üblich.

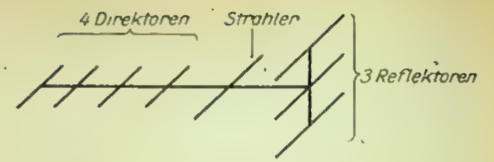


Abb. 11.4.4-5 Schema einer Yagiantenne (8 Elemente)

Als *Sendeantennen* werden vorwiegend *selbstschwingende Vertikal-* und *Dreieckflächenantennen* (LW, MW) eingesetzt, ferner noch *Dipolgruppen*, *Reflektorwandantennen* und *logarithmisch-periodische Antennen* (KW), im UKW-Bereich *Dipolfelder*.

Empfangstechnik. Als *Empfangsantennen* im Hörrundfunk werden u. a. die *Ferritantenne* (LW, MW), die *Stabantenne* (KW) und die *Yagiantenne* (UKW) (Abb. 11.4.4-5) verwendet. Der *Hörrundfunkempfänger* siebt aus dem von der Empfangsantenne angebotenen Frequenzspektrum die gewünschte Frequenz aus, verstärkt und demoduliert sie, um das tonfrequente Signal zurückzugewinnen. Nach dessen Verstärkung wird die tonfrequente Energie dem Lautsprecher zugeführt (Abb. 11.4.4-6), der die entsprechende Schallenergie abstrahlt. Heute sind praktisch nur noch *Überlagerungsempfänger* (kurz *Super* genannt) im Einsatz, da sie hinsichtlich Empfindlichkeit und Trennschärfe (Selektion) den früher verwendeten *Geradeaus-*

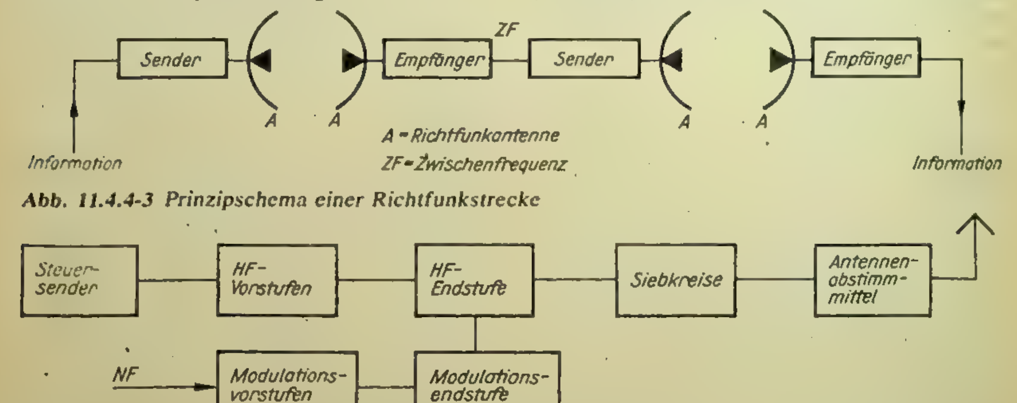


Abb. 11.4.4-3 Prinzipschema einer Richtfunkstrecke

Abb. 11.4.4-4 Prinzipschema eines AM-Senders (KW, MW, LW)

empfängern weit überlegen sind. Im Oszillator des Supers wird eine HF-Schwingung erzeugt. Diese Oszillatorfrequenz wird bei Betätigung des Abstimmknopfes um den gleichen Betrag wie die Empfangsfrequenz verändert. Die entstehende konstante Differenz ($f_0 - f_E$) heißt *Zwischenfrequenz* (*ZF*). Sie beträgt bei AM-Geräten 452 bis 472 kHz, bei FM-Geräten 10,7 MHz. Die meisten Hörrundfunkempfänger sind kombinierte AM/FM-Empfänger. Um Schwunderscheinungen auszugleichen, besitzen praktisch alle Empfänger eine *automatische Verstärkungsregelung* (*AGC*, von engl. automatic gain control). Das ist eine Schaltungsanordnung, die gewährleistet, daß Schwankungen des Empfängereingangssignals so ausgeregelt werden, daß das Ausgangssignal des Empfängers konstant bleibt.

Bei der *automatischen Frequenzregelung* (*AFC*, von engl. automatic frequency control) werden Änderungen der Resonanzfrequenz des Oszillators des Empfängers z. B. infolge Temperaturschwankung ausgeglichen.

lennummern gesendet wird, so daß die doppelte *Bildwechselfrequenz* vorgetäuscht wird. Alle Übertragungsparameter müssen beim *Fernsehrundfunk* in einer *Fernsehnorm* festgelegt werden. Die wichtigsten Parameter der Fernsehnorm sind: 625 Zeilen, Bildhöhe : Bildbreite = 3:4, 25 Vollbilder je Sekunde, Bandbreite des Bildsignals = 5 MHz, Bild-Tonträger-Abstand = 5,5 MHz, Bildsignal amplitudenmoduliert, Tonsignal frequenzmoduliert, Einseitenband-Übertragung.

Studiotechnik. Zur Aufnahme bewegter Szenen dienen *Fernsehkameras*. Die *Bildaufnahmeröhre* in der Kamera zerlegt das Bild in Bildelemente und setzt deren Helligkeit in elektrische Signale um. Es werden meist Bildaufnahmeröhren vom *Vidikon*-Typ verwendet, teilweise auch *Super-Orthikons*. Die Kamera enthält alle Baugruppen für den Betrieb der Bildaufnahmeröhre, wie z. B.

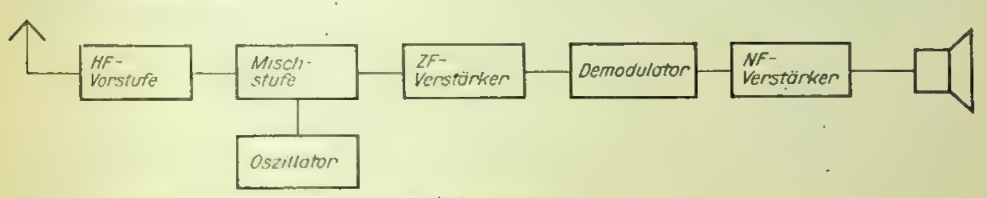


Abb. 11.4.4-6 Prinzipschema eines Hörrundfunkempfängers

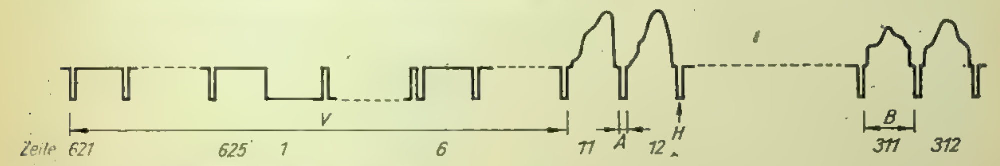


Abb. 11.4.5-1 Vollständiges Fernsehsignal

11.4.5. Fernsehrundfunk

Um Bilder elektrisch übertragen zu können, zerlegt man sie in einzelne kleine *Bildelemente*, die zeilenweise abgetastet werden. Ihre Helligkeitswerte werden nacheinander in elektrische *Bildsignale B* umgewandelt. Während des Zeilenrücklaufs wird ein Bezugswert für Bildschwarz – das *Austastsignal A* – übertragen. Zusätzlich müssen *Synchronsignale S* übermittelt werden, die anzeigen, wann eine Zeile bzw. ein Bild beginnt. Das zusammengesetzte *BAS-Signal* ist das vollständige Fernsehsignal, das alle Informationen zur Rekonstruktion eines Schwarzweißbilds am Empfangsort enthält (Abb. 11.4.5-1). Bewegte Szenen löst man wie beim Film in einzelne Bewegungsphasen auf, deren Bilder in schneller Folge nacheinander übertragen werden. Das Flimmern wird durch das *Zeilensprungverfahren* vermindert, bei dem abwechselnd ein *Halbbild* mit nur ungeraden Zeilennummern und eines mit nur geraden Zei-

Stromversorgungsgeräte, Kippgeräte zur horizontalen und vertikalen Ablenkung des Elektronenstrahls der Bildaufnahmeröhre sowie Vor- und Hauptverstärker, die Optik – meist als Variooptik mit veränderbarer Brennweite –, einen elektronischen Sucher und Einstell- und Bedienelemente (Abb. 11.4.5-2).

Filme können mit *Filmabtastern* abgetastet werden, bei denen ein Filmprojektor mit einer Fernsehkamera gekoppelt ist. Beim *Lichtpunktabtaster* wird ein schnell wandernder Lichtpunkt auf dem Filmbild abgebildet und das durch den Film gelangende Licht in elektrische Bildsignale umgewandelt. Auch Diapositive oder undurchsichtige Vorlagen können mit Abtastern übertragen werden.

Man kann Fernsehsignale auch auf Magnetband speichern. Beim *Transversalspur-Videospeichergerät* wird ein ≈ 50 mm breites Magnetband an einer schnell rotierenden Kopftrommel mit 4 Magnetköpfen vorbeigeführt. Die aufgezeichneten Spuren, die die Information als frequenz-

moduliertes Fernsehsignal enthalten, verlaufen fast senkrecht zur Bandlängsrichtung. Am oberen und unteren Rand des Bands werden schmale Spuren für den Ton und für Regelzwecke in Längsrichtung aufgebracht. Es gibt auch *Schrägspur-Videospeichergeräte*, bei denen die aufgezeichneten Spuren in spitzem Winkel zur Bandlängsrichtung verlaufen.

Alle Bildgeber werden im Fernsehstudio von einer Impulszentrale mit einem *Taktgeber* gesteuert. Er erzeugt die horizontalen und vertikalen Synchronsignale und das Austastsignal. Auf diese Weise wird ein Gleichlauf aller Geräte erzwungen. Dadurch ist auch das störungsfreie Umschneiden von einer zur anderen Kamera oder zu Videospeichergeräten mit *Bildmischgeräten* und *Effektgeneratoren*, welche besondere Figuren, wie z. B. Streifen, Kreise oder Rechtecke, erzeugen, möglich. Als Meßgeräte im Studio dienen u. a. *Fernsehoszilloskope*, mit denen der zeitliche Verlauf des Fernsehsignals dargestellt werden kann, und *Monitore*, die das aufgenommene und gesendete Fernsehbild wiedergeben. Mit Hilfe optischer Auf- und Rückprojektionsverfahren lassen sich Hintergründe von Film oder Diapositiv aus ins Fernsehbild bringen. Zur technischen Ausrüstung eines Fernsehstudiokomplexes gehören ferner Film- bzw. Lichtpunktabtaster, Beleuchtungsanlagen und Anlagen zur Aufnahme des Tons sowie Regie-, Steuer- und Kontrolleinrichtungen. Es gibt auch Studios, die wahlweise für Fernseh- und Filmaufnahmen benutzt werden. Fernsehaufnahmen werden dann mit Hilfe eines *Übertragungswagens* durchgeführt. Die auch für Aufnahmen außerhalb der Studios eingesetzten Übertragungswagen enthalten meist 2 bis 4 Fernsehkameras, Taktgeber, Regie- und Mischgeräte und die zugehörigen Meß- und Kontrollgeräte.

Farbfernsehverfahren. Zur Wiedergabe farbiger Bilder werden beim Farbfernsehen 3 *Farbauszüge* des Bildes in entsprechend gewählten *Primärfarben* additiv gemischt. Projiziert man z. B. einen roten, einen grünen und einen blauen Farbauszug des gleichen Bildes deckungsgleich übereinander, so entsteht wieder das Bild in den natürlichen Farben. Bei der Wiedergabe des farbigen Bildes auf der Farbbildröhre des Empfängers werden die 3 Farbauszüge von ineinander verschachtelten sehr kleinen Leuchtstoffflächen erzeugt. Diese Flächen werden von den 3 Bildsignalen für den roten, grünen und blauen Farbauszug angesteuert, den Farbwertsignalen *R, G, B*.

Die verschiedenen Farbfernsehverfahren unterscheiden sich in der Art der Übertragung der Farbwertsignale. Bei gleichzeitiger Übertragung wäre die dreifache Bandbreite gegenüber dem Schwarzweißfernsehen notwendig, und die Farbsendungen könnten nicht mit einem Schwarzweißgerät empfangen werden. Gerade diese Kompatibilität wird aber gefordert, d. h. Farbsendungen müssen mit einem Schwarzweißempfänger und Schwarzweißsendungen mit einem Farbempfänger jeweils als Schwarzweißbild empfangen werden können. Deshalb besteht das Bildsignal bei allen heute gebräuchlichen Farbfernsehverfahren aus einem *Helligkeitssignal Y*, das dem Bildsignal beim Schwarzweißfernsehen entspricht, und einem *Farbartsignal F*, das nichts zur Helligkeit des Bildes beiträgt. Das Helligkeitssignal wird aus den Anteilen der Farbwertsignale nach der folgenden Gleichung $Y = 0{,}30\,R + 0{,}59\,G + 0{,}11\,B$ gebildet, das Farbartsignal wird aus den *Farbdifferenzsignalen* $(R-Y)$ und $(B-Y)$ zusammengesetzt. Das Farbartsignal ist bei weißen und unbunten Bildflächen gleich Null und wächst mit zunehmender *Farbsättigung*. Zum vollständigen Farbfernseh- oder *FBAS-Signal* gehören wiederum Austast- und Synchronsignale.

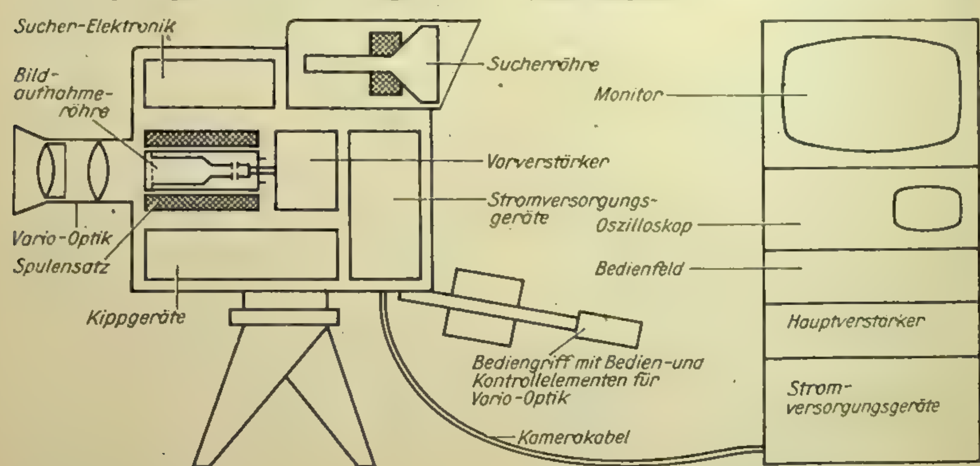


Abb. 11.4.5-2 Fernsehkamera



Abb. 11.4.5-3 Spektrum eines Farbfernsehsignals mit Helligkeits- oder Schwarzweißsignal (durchgehende Linie) und Farbartsignal (gestrichelte Linie)

Man überträgt das Helligkeitssignal mit voller Bandbreite, während aufgrund psychometrischer Untersuchungsergebnisse für die Farbdifferenzsignale etwa ein Drittel der Bandbreite ausreicht. Das mit voller Schärfe wiedergegebene Helligkeitsbild wird also mit Hilfe des Farbartsignals etwas unscharf koloriert. Das Farbartsignal wird im oberen Drittel der Bandbreite des Helligkeitssignals in dieses frequenzmäßig verschachtelt übertragen (Abb. 11.4.5-3). Nach der Art der *Codierung* der Farbdifferenzsignale und der Modulation des Farbartsignals unterscheiden sich die 3 eingeführten Verfahren NTSC (*n*ational *t*elevision *s*ystem *c*ommittee), PAL (*p*hase *a*lternating *l*ine = Phasenwechsel je Zeile) und SECAM (*s*ystem *sé*quentiel *c*ouleurs *à* *m*émoire = Farbfolgesystem mit Speicherung). Beim NTSC- und PAL-Verfahren wird eine Quadraturmodulation verwendet, d. h. die *Farbträgerfrequenz* wird mit den beiden Farbdifferenzsignalen nach Amplitude und Phase moduliert. Beim SECAM-Verfahren wird von Zeile zu Zeile abwechselnd nur das rote oder das blaue Farbdifferenzsignal übertragen und das in einer Verzögerungsleitung gespeicherte Farbdifferenzsignal der vorhergehenden Zeile wieder im Empfänger zugesetzt.

Farbfernseh-Studiotechnik. *Farbfernsehkameras* enthalten i. allg. mindestens 3 Bildaufnahmeröhren, z. B. *Plumbikons*, für die Erzeugung der 3 Farbwertsignale *R*, *G*, *B* zuweilen auch eine 4. Bildaufnahmeröhre für das Helligkeitssignal *Y*. Das optische Bild der Szene wird mit einer *Farbteileroptik*, die aus dichroitischen Spiegeln besteht, welche nur in begrenzten Spektralbereichen reflektieren, in die 3 Farbauszüge zerlegt (Abb. 11.4.5-4). Die optische Abbildung und die Ablenkungen der Abtast-Elektronenstrahlen in den 3 Bildaufnahmeröhren müssen mit hoher Präzision erfolgen, damit gewährleistet wird, daß das Bildsignal immer von einander zugeordneten Bildelementen der 3 Farbauszüge stammt und keine Farbsäume entstehen. Außerdem muß durch die Wahl der spektralen Anpassung in den 3 Farbkanälen erreicht werden, daß unbunte Bildflächen auch unbunt und farbige Details in möglichst naturgetreuen Farben wiedergegeben werden. Auch auf die Art der Beleuchtung, z. B. mit Tageslicht oder Kunstlicht, muß eine Farbkamera durch Justierung der elektrischen Verstärkung in den 3 Farbkanälen genau abgeglichen sein.

Als weitere Bildgeber stehen heute wie beim Schwarzweißfernsehen Abtaster für Filme und Diapositive und Videospeichergeräte zur Verfügung. Der Taktgeber muß beim Farbfernsehen zusätzlich zu den Austast- und Synchronsignalen auch Farbträger-, Farbsynchron- und Farbidentifikationssignale erzeugen. Die Technik der Bildmischung ist wesentlich komplizierter als beim Schwarzweißfernsehen. Schließlich gehört in jedes Farbstudio mindestens ein *Coder*, der die Codierung nach dem angewandten Farbfernsehverfahren vornimmt.

Übertragungstechnik. Das vom Studio gelieferte videofrequente Signal muß nun mittels der Übertragungstechnik zum Fernsehrundfunksender gebracht werden. Das gilt sowohl für Schwarzweiß- wie auch für Farbfernsehsignale.

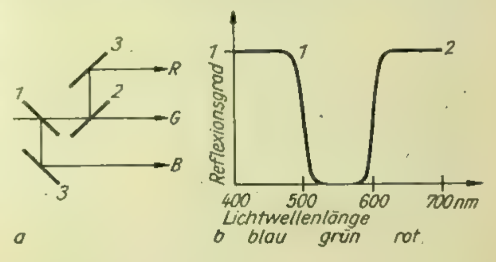


Abb. 11.4.5-4 Funktionsschema einer Farbteileroptik

Eine drahtgebundene Möglichkeit ist die über *Breitbandkabel*; der zugehörige Fernsehbegleitton wird getrennt übertragen. Die Verlegung derartiger Breitbandkabel ist jedoch sehr kostenaufwendig.

Die größte Verbreitung als Übertragungsmedium hat eindeutig der *Richtfunk* (vgl. 11.4.6.), dessen Qualitätsparameter auch allen Anforderungen des Farbfernsehens genügen. Die Richtfunktechnik ist im Prinzip die gleiche wie bei der Übertragung von tonfrequenten Signalen, jedoch bestehen Unterschiede in der zu übertragenden Bandbreite von mehr als 2 Größenordnungen (Ton ≈ 15 kHz, Bild ≈ 5 MHz). Das bedeutet, daß für die Videoübertragung spezielle *Breitband-Richtfunksysteme* eingesetzt werden. Diese Systeme gestatten meistens auch die gleichzeitige Übertragung des Fernsehbegleittons.

Auch bei Fernsehrundfunksendern wird für die Modulationszuführung von Sender zu Sender gelegentlich (häufiger als Reserveweg) der *Ballempfänger* eingesetzt. Der Fernsehballempfänger ist ein Gerät, welches speziell für die videofrequente Übertragung geeignet ist. Der Fernsehbegleitton wird mit übertragen. Eine

Qualitätsbeeinträchtigung beim Farbfernsehen tritt nicht auf. Auch hier gilt die Feststellung, daß der Ballempfang weitaus billiger als der Richtfunk, dafür aber störanfälliger ist.

Sendetechnik. Ein Fernsehrundfunksender besteht im Prinzip aus 2 Sendern, dem Bild- und dem Tonsender. Beide Sender bekommen ihre Modulationssignale zugeführt, das Video- und das Tonsignal (Fernsehbegleitton). Die Ausgangsleistungen des AM-Bildsenders und des FM-Tonsenders werden im *Diplexer* zusammengeschaltet und dann der Sendeantenne zugeleitet. Diese Zusammenschalteinrichtung ist eine umfangreiche Filteranordnung, deren Aufgabe darin besteht, beide Senderleistungen reflexionsarm und rückwirkungsfrei zu vereinigen (Tab. 11.4.5-5).

Die Senderleistungen liegen zwischen 1 und 40 kW, dabei hat der Tonsender eine geringere Leistung (Leistungsverhältnis 10:1). Der Tonsender ist im prinzipiellen Aufbau mit einem UKW-Sender identisch. Die heutigen Fernsehrundfunksender sind zwischenfrequenzmoduliert (Bild-ZF 38,9 MHz, Ton-ZF 33,4 MHz). Nach dem Modulator folgt dann das *Restseitenbandfilter*, das entsprechend der Fernsehnorm im Frequenzspektrum des modulierten HF-Signals das untere Seitenband bis auf einen Rest in der Höhe des Bildträgers unterdrückt. Man nennt dieses Verfahren daher *Restseitenbandverfahren*.

Als *Fernsehsendeantennen* werden vorzugsweise *Dipolfelder* verwendet.

Empfangstechnik. Als *Empfangsantennen* werden hauptsächlich *Yagiantennen* eingesetzt (vgl. 11.4.7.). Der *Fernsehrundfunkempfänger* ist im Prinzip ebenfalls ein kombinierter AM/FM-Empfänger, wobei hier der AM-Teil allerdings sehr breitbandig (≈ 5 MHz) ist

Tab. 11.4.5-5 *Frequenzbereiche des Fernsehrundfunks*

Band I	41... 68 MHz
Band III	174...230 MHz
Band IV/V	470...790 MHz

(Abb. 11.4.5-6). Nach dem Überlagerungsprinzip wird aus der Empfangsfrequenz in Verbindung mit der Oszillatorfrequenz die Zwischenfrequenz gebildet. Nach Verstärkung und Demodulation stehen die Bild- und Tonsignale wieder zur Verfügung. Beim Farbfernsehempfänger wird zusätzlich im Farbdemodulator das Farbsignal gewonnen. Im Amplitudensieb werden die Synchronsignale abgetrennt, die dann die Generatoren für die Horizontal- und Vertikalablenkung des Elektronenstrahls der Bildröhre steuern. Das vom Demodulator gelieferte Leuchtdichtesignal (schwarz-weiß) wird mit dem Farbsignal der Matrix zugeführt, an deren Ausgang dann die Signale R, G, B für die Ansteuerung der Farbbildröhre zur Verfügung stehen. Beim Schwarzweißgerät oder bei einer Schwarzweißsendung erfolgt die Steuerung der Bildröhre nur durch das Leuchtdichtesignal. Die Farbpunkte R, G, B liegen auf dem Farbbildschirm so eng beieinander, daß das Auge eine Mischfarbe aus den 3 Farbstrahlen sieht.

Industriefernsehen. Für Überwachungs-, Kontroll- und Steuerzwecke werden in Industrie, Handel, Verkehr, Forschung usw. Fernsehanlagen eingesetzt, bei denen die Aufnahmekamera meist über Kabel mit einem oder mehreren Bildwiedergabegeräten fest verbunden ist. Die technischen Parameter, z. B. die Zeilenzahl, richten sich nach dem Verwendungszweck. Da bei Industrie-Farbfernseh-Anlagen keine Kompatibilität notwendig ist, werden die 3 Farbwertsignale meist ohne Codierung gleichzeitig übertragen.

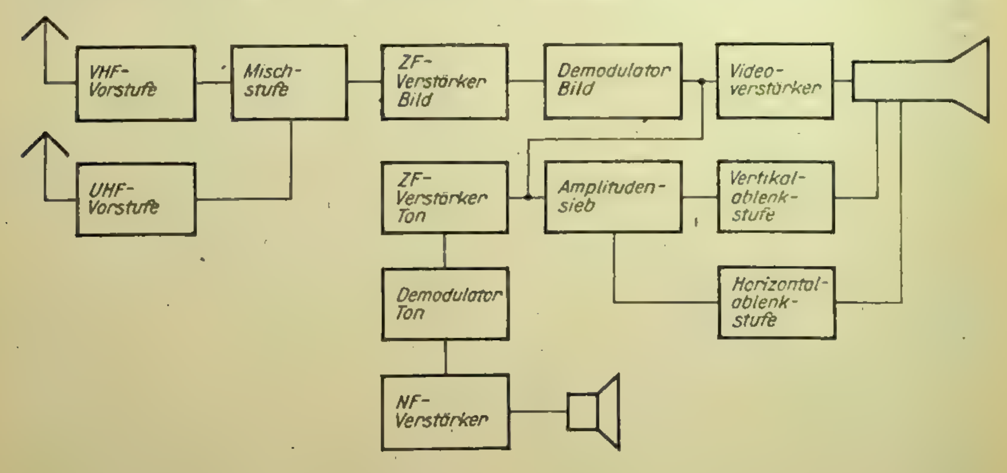


Abb. 11.4.5-6 *Fernsehrundfunkempfänger*

Terminologie. Die Bestimmung des Standorts eines Objekts, insbesondere eines Fahrzeugs, mit Hilfe technischer oder natürlicher Mittel wird als *Ortung* bezeichnet. Erfolgt diese Bestimmung mit funktechnischen Mitteln, so gilt die Bezeichnung *Funkortung*. Bei der *Eigenortung* wird die Bestimmung im Objekt, dessen Standort gesucht ist, selbst vorgenommen; bei der *Fremdortung* erfolgt die Bestimmung an Punkten außerhalb des Objekts. Das Ortungsergebnis kann erforderlichenfalls dem Objekt über eine Funkverbindung mitgeteilt werden.

Funknavigation. Die Führung eines Objekts, insbesondere eines Fahrzeugs, auf der Erdoberfläche (Landverkehr, Seefahrt) oder im Raum (Luftfahrt, Raumfahrt) von einem Ausgangspunkt nach einem vorgegebenen Zielpunkt auf bestimmten Wegen bzw. Bahnen unter Einhaltung vorgegebener Zeiten mit Hilfe funktechnischer Mittel wird als *Funknavigation* bezeichnet. Sie erfolgt entweder aufgrund diskreter oder kontinuierlicher Funkortungen, die mit kooperativen Funkortungssystemen gewonnen werden, oder aufgrund kontinuierlicher Weg- oder Ortsbestimmungen, die mit autonomen Systemen, insbesondere mit Koppelverfahren, gewonnen werden. Zwischen den durch diskrete Ortungen gefundenen Punkten in der Ebene oder im Raum wird die Navigation häufig längs einer Standlinie durchgeführt, insbesondere wenn die Standlinie eine Gerade ist.

Funkortungssysteme lassen sich entsprechend der funktionellen Abhängigkeit in 2 Gruppen einteilen: *kooperative Systeme* (Zusammenarbeit des ortenden Objekts mit einer funktechnischen Einrichtung außerhalb des Objekts, z. B. auf der Erde oder in einem Satelliten) und *nichtkooperative Systeme* (selbständig und unabhängig von funktechnischen Einrichtungen außerhalb des Objekts arbeitend), meist als *autonome Systeme* bezeichnet. Für die in der Luftfahrt benutzten Funkortungssysteme gibt es eine weitere Unterteilung: Systeme für die Streckennavigation und Systeme für die Anflug- und Landenavigation sowie Systeme für die Flugsicherungskontrolle.

Grundverfahren der Funkortung. Die bei den verschiedenen Funkortungssystemen angewendeten Verfahren lassen sich klassifizieren. Unter der Voraussetzung, daß die Systeme zur Ortung in der Horizontalebene dienen (das gilt für die Seefahrt exakt und annähernd auch für die Luftfahrt, weil das Verhältnis Flughöhe zu Entfernung meist sehr klein ist), bietet die Klassifizierung nach der Art der bei den Verfahren gewonnenen Standlinie eine gute Übersicht. Eine *Standlinie* ist eine Kurve, auf der eine mit Hilfe eines bestimmten funktechnischen Verfahrens meßbare geometrische Größe, z. B. Winkel, Entfernung, Entfernungsdifferenz, konstant bleibt. Diese Größe wird auch als *Funkkoordinate* bezeichnet. Als Standlinien kommen vor: Gerade (Winkel), Kreis (Entfernung), Hyperbel (Entfernungsdifferenz). Ein Standort ergibt sich jeweils aus dem Schnittpunkt von 2 Standlinien, wobei die 2 Standlinien von gleicher oder verschiedener Art sein können.

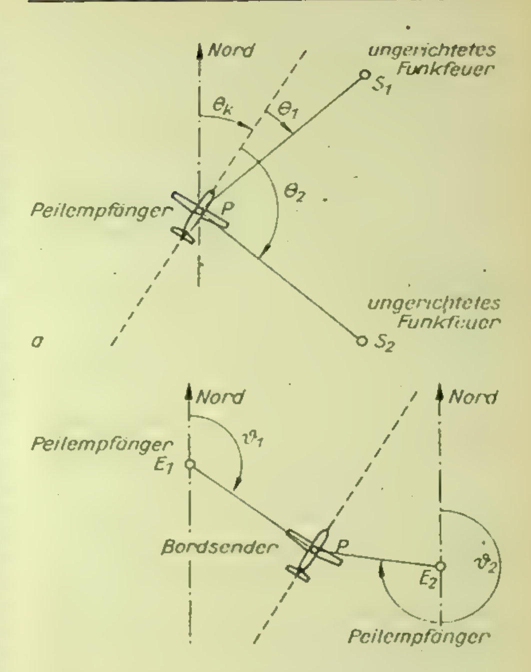


Abb. 11.4.6-1 Ortung durch Bestimmung von 2 Winkeln: a Eigenpeilung Winkel Θ_1 und Θ_2, b Fremdpeilung Winkel ϑ_1 und ϑ_2

Kooperative Systeme der Funkortung. ***Funkortungssysteme mit Standlinie Gerade*** beruhen auf der Bestimmung des Richtungswinkels in der Horizontalebene mit Richtempfangs- oder Richtsendeverfahren.

Richtempfangsverfahren arbeiten mit einem Empfänger, dessen Antenne eine Richtwirkung besitzt, mit der die von einem Sender (Funkfeuer) abgestrahlten Wellen aufgenommen werden, sog. Peilempfänger oder *Peiler*. Aus der gemessenen Empfangsspannung in Abhängigkeit vom Winkel wird die Richtung zum Sender festgestellt, die sog. *Funkpeilung*. Bei der *Eigenpeilung* (Abb. 11.4.6-1a) werden die Wellen der 2 Sender S_1 und S_2 durch den an Bord des ortenden Fahrzeugs befindlichen Peilempfänger aufgenommen und damit die beiden Winkel Θ_1 und Θ_2 *(Funkseitenpeilung)* bestimmt. Mit Hilfe des vom Kompaß gelieferten Kurswinkels Θ_k und den Koordinaten der Orte von S_1 und S_2 läßt sich der Standort angeben. Bei der *Fremdpeilung* (Abb. 11.4.6-1b) befindet sich im ortenden Fahrzeug ein Sender, der ohne Richtwirkung

arbeitet. An 2 festen Punkten steht je ein Peilempfänger E_1 und E_2, mit denen die Peilwinkel ϑ_1 und ϑ_2 bestimmt werden. Aus dem Schnittpunkt ergibt sich der Standort.

In den Peilern werden Rahmenantennen (vgl. 11.4.7.) mit Dreh-, Kreuzrahmen, Ferritkern- und Adcock-Antennen verwendet. Da hierbei die Antennenabmessungen klein gegenüber der Wellenlänge sind, werden die damit ausgerüsteten Peiler als *Kleinbasispeiler* bezeichnet. Sie werden vor allem an Bord von Schiffen und Luftfahrzeugen eingesetzt. Eigenortung wird auf Schiffen mit Hand- (Drehrahmen-, Goniometerpeiler) oder automatischen Peilern (Sichtfunkpeiler) in Frequenzbereichen zwischen 200 kHz und 156 MHz vorgenommen, an Bord von Luftfahrzeugen mit dem Radiokompaß (200 bis 1800 kHz). Fremdortung wird in erster Linie im Rahmen der Verkehrssicherung angewendet, wobei bevorzugt Sichtfunkpeiler in Verbindung mit Adcock-Antennen benutzt werden. Peiler, deren Antennenanlage Abmessungen besitzen, die groß gegenüber der Wellenlänge sind, bezeichnet man als *Großbasispeiler*. Dazu gehören Doppler-Peiler und Interferometer. Der *Doppler-Peiler* (100 bis 156 MHz, 225 bis 400 MHz) liefert genauere Peilwerte bei ungünstigen Wellenausbreitungen, das *Interferometer* (> 1 GHz) hat eine wesentlich größere Winkelauflösung. Das einfachste Interferometer besteht aus 2 Empfangsantennen mit einem Abstand, der groß gegenüber der Wellenlänge ist. Das Verfahren der Richtungsbestimmung wird auch bei Ortungssystemen benutzt, bei denen sich die Gegenstelle zum ortenden Objekt nicht am Boden, sondern in einem Satelliten befindet (*Satelliten-Funkortungssystem*), wobei zur Erzielung einer hohen Genauigkeit die Fremdortung angewendet wird.

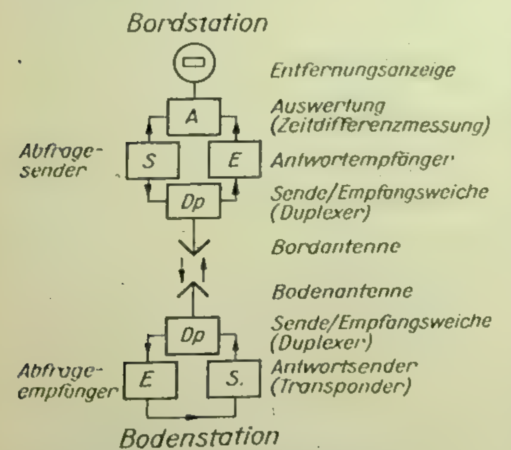


Abb. 11.4.6-2 Funktionsschaltbild eines Entfernungsmeßsystems (DME)

Richtsendeverfahren arbeiten mit einer am Boden stehenden Sendeanlage (*Funkfeuer*), deren Antenne eine Richtwirkung mit einer oder mehreren Strahlungskeulen aufweist. Zu unterscheiden sind dabei Markierungs-, Kurs- und Drehfunkfeuer.

Markierungsfunkfeuer (75 MHz) erzeugen eine keulenförmige Strahlung senkrecht nach oben. Beim Überfliegen eines Markierungsfunkfeuers wird mit dem 75-MHz-Bordempfänger die ausgestrahlte Welle empfangen und mit einer Signallampe angezeigt. Markierungsfunkfeuer dienen zur Kennzeichnung bestimmter Punkte, z. B. für den Landeanflug.

Kursfunkfeuer (200 bis 400 kHz, 108 bis 112 MHz) liefern 4 schmale Leitstrahlen in der Horizontalebene, die in der Luftfahrt zur Kursführung dienen. Sie sind nur noch vereinzelt in Gebrauch, da sie durch die Drehfunkfeuer ersetzt werden können.

Drehfunkfeuer erzeugen einen Leitstrahl oder mehrere Leitstrahlen, die sich periodisch drehen und den gesamten Winkelbereich von 0 bis 360° erfassen. Das Langwellendrehfunkfeuer *Consol* (200 bis 400 kHz) erzeugt gleichzeitig 24 sich drehende Leitstrahlen. Auf den Leitstrahlen wird mit einem Bordempfänger ein Dauerton, zwischen den Leitstrahlen eine Folge von kurzen („Punkte") und langen („Striche") Zeichen gehört. Nach Abzählen der „Punkte" und „Striche" kann auf einer speziellen Navigationskarte die zugeordnete Standlinie (Gerade) aufgesucht werden. Aus 2 derartigen Geraden ergibt sich mit dem Schnittpunkt der Standort. Consol wird in erster Linie in der Seefahrt mit Reichweiten von 1000 bis 2500 km benutzt. Das *UKW-Drehfunkfeuer* in seiner international standardisierten Ausführung im Frequenzbereich 108 bis 118 MHz (Bezeichnung *VOR*, very high frequency omnidirectional range, etwa UKW-Drehfunkfeuer aus allen Richtungen) erzeugt mit einer mit 30 U/s rotierenden Richtantenne eine umlaufende Strahlungskeule. In einem Bordempfänger ruft die umlaufende Strahlungskeule eine Amplitudenmodulation der Empfangsspannung hervor, deren Phasenwinkel gegenüber einem Bezugsphasenwinkel gleich dem Azimut ist (Richtungswinkel in der Horizontalebene in Richtung der VOR-Station bezogen auf Nordrichtung). Bei der Anwendung in der Luftfahrt benutzt man in erster Linie die Standlinie (Gerade) zur Kursführung in Luftstraßen. Für eine Standortbestimmung müssen 2 Standlinien (Azimute) ermittelt werden, deren Schnittpunkt den Standort ergibt. Die Reichweite beträgt bei Flughöhen von $\geqq 3000$ m ≈ 200 km. Eine Weiterentwicklung des VOR ist das *Doppler-VOR*, das auch bei ungünstigen Wellenausbreitungen eine hohe Genauigkeit erreicht.

Funkortungssysteme mit Standlinie Kreis beruhen auf der Bestimmung der Entfernung zwischen dem ortenden Objekt, z. B. Luftfahrzeug, und einer z. B. am Boden stehenden Funkstation. Die

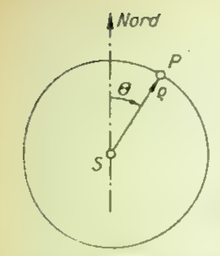


Abb. 11.4.6-3 Ortung mit Polarkoordinatensystem

funktechnische Messung erfolgt mit der aktiven Rückstrahlung, indem vom Sender (Frequenzbereich 1 GHz) des Luftfahrzeugs (Abfragesender) ein impulsförmiges Signal gesendet und von der Bodenstation empfangen wird (Abfrageempfänger). Dieses Signal wird nach Verstärkung vom Sender der Bodenstation (Antwortsender) ausgestrahlt und vom Empfänger des Luftfahrzeugs (Antwortempfänger) aufgenommen. Aus der Zeitdifferenz zwischen gesendetem und empfangenem Signal ergibt sich die Entfernung. Die Bordstation des Luftfahrzeugs wird als *Interrogator* (Abfrager), die Bodenstation als *Transponder* (Antworter) bezeichnet (Abb. 11.4.6-2). Beide Stationen bilden zusammen ein *Entfernungsmeßsystem* (*DME*, *d*istance *m*easurement *e*quipment). Für eine Standortbestimmung müssen 2 Entfernungen ϱ_1 und ϱ_2 zu 2 verschiedenen Bodenstationen ermittelt werden. Wegen der Doppeldeutigkeit des Ortungsergebnisses durch die 2 Schnittpunkte wird das DME-System nicht allein, sondern nur zusammen mit einem anderen Funkortungssystem benutzt. Das *Satelliten-Navigationssystem NNSS* (150 MHz, 400 MHz) für die Seefahrt arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip. Es bietet Ortungsgenauigkeiten von einigen 100 m über den gesamten Erdumfang. Der Bordgeräteaufwand ist relativ hoch.

Funkortungssysteme mit Standlinie Gerade und Kreis ergeben Standorte in Polarkoordinaten Azimut Θ und Entfernung ϱ (Abb. 11.4.6-3). Bei den kooperativ arbeitenden Polarkoordinatenortungssystemen ist zu unterscheiden zwischen Systemen mit Eigenortung und solchen mit Fremdortung. Bei allen erfolgt die Entfernungsmessung nach dem Prinzip der aktiven Rückstrahlung wie beim DME-System. Das System *TACAN* (*ta*ctical *a*ir *n*avigation, 960 bis 1215 MHz) liefert gleichzeitig Azimut und Entfernung; es stellt somit ein vollständiges Polarkoordinatenortungssystem dar. Demgegenüber ist das in der zivilen Luftfahrt international standardisierte System *VOR-DME* eine Kombination bestehend aus dem System VOR (108 bis 118 MHz) und dem Entfernungsteil von TACAN, das hier ebenfalls mit DME bezeichnet wird. Die damit erzielbare Reichweite beträgt bei Flughöhen ≧ 3000 m max. 200 km, die Genauigkeit im Mittel ± 1,3° bzw. ± 200 m + 0,02 ϱ.

Sekundärradar stellt im Prinzip ebenfalls ein Polarkoordinatenortungssystem dar; es wird jedoch nach dem Fremdortungsverfahren betrieben (Abb. 11.4.6-4). Die Entfernungsmessung erfolgt wie bei DME und TACAN, jedoch ist die Gerätezuordnung umgekehrt, d. h. beim Sekundärradar befindet sich der Interrogator (1030 MHz) am Boden und der Transponder (1090 MHz) an Bord des Luftfahrzeugs. Außerdem wird mit dem Antwortsignal vom Luftfahrzeug die Kennung und die Flughöhe an die Bodenstation übertragen. Während bei TACAN und VOR-DME das Azimut mit Hilfe des Richtsendeverfahrens wie bei VOR gewonnen wird, wird beim Sekundärradar das Richtempfangsverfahren angewendet, indem sich das Azimut aus der Antennenrichtung im Moment des eintreffenden Antwortsignals (wie beim Primärradar) ergibt. Das Sekundärradar wird in der Luftfahrt bei den Flugsicherungskontrollstellen, meist gemeinsam mit Primärradar, eingesetzt.

Funkortungssysteme mit Standlinie Hyperbel beruhen auf der Bestimmung der Entfernungsdifferenz, die zwischen dem ortenden Objekt, z. B. Schiff oder Luftfahrzeug, und 2 festen Orten besteht. Alle Punkte mit gleicher Ent-

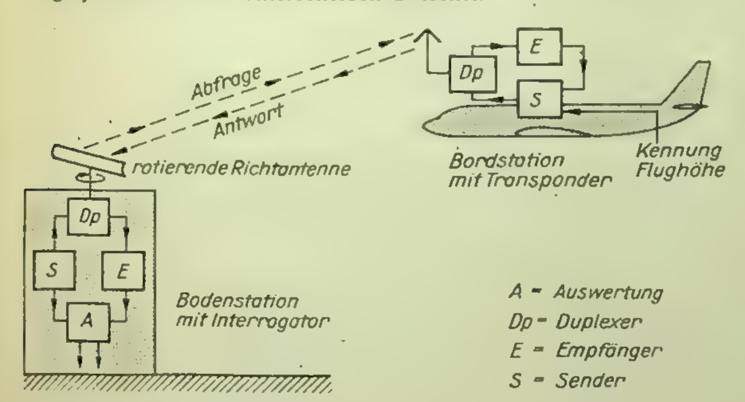


Abb. 11.4.6-4 Sekundärradar

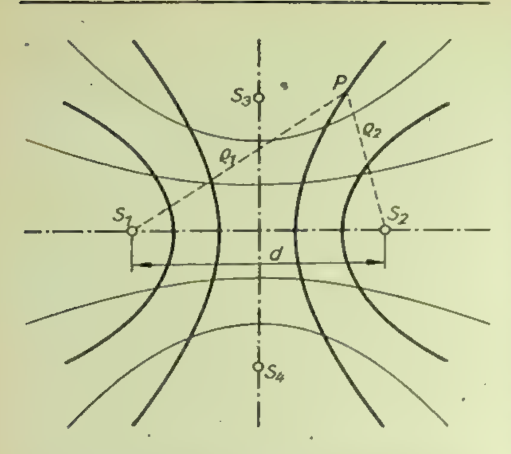


Abb. 11.4.6-5 Ortung durch Bestimmung von 2 Entfernungsdifferenzen vom Punkt P zu den Senderpaaren S_1/S_2 und S_3/S_4

fernungsdifferenz ($\varrho_1 - \varrho_2$) liegen auf einer Hyperbel (Abb. 11.4.6-5). Die funktechnische Bestimmung erfolgt durch Messen der zeitlichen Differenz der im ortenden Objekt ankommenden Signale, die synchron von den an den festen Orten stehenden Sendern S_1 und S_2 ohne Richtwirkung ausgestrahlt werden. Die Zeitdifferenz ist bei konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen proportional der Entfernungsdifferenz. Die vielen möglichen Entfernungsdifferenzen ergeben eine Schar von Hyperbeln, deren Brennpunkte die Orte von S_1 und S_2 sind. Für eine Standortbestimmung sind 2 Hyperbeln aus 2 verschiedenen Hyperbelscharen mit 2 Senderpaaren S_1/S_2 und S_3/S_4 erforderlich. Es gibt 2 Verfahren zur Messung der zeitlichen Differenz. Bei dem *Impulsverfahren* wird die Zeitdifferenz der von S_1 und S_2 gesendeten Impulse gemessen, dagegen bei dem *CW-* (engl. continuous waves = kontinuierliche Wellen) *Verfahren* die Phasendifferenz der von S_1 und S_2 ausgestrahlten Wellen.

Das *System Loran-A* (long range navigation, 1750 bis 1950 kHz) arbeitet nach dem Impulsverfahren; es wird in der Luft- und Seefahrt angewendet, die maximale Reichweite beträgt ≈ 1500 km. Das *System Decca* (70 bis 130 kHz) arbeitet nach dem CW-Verfahren; es wird fast nur in der Seefahrt eingesetzt, die maximale Reichweite liegt bei ≈ 450 km. – Das *System Loran-C* (100 kHz) arbeitet mit beiden Verfahren und erreicht damit eine höhere Genauigkeit. Die maximale Reichweite beträgt ≈ 4000 km. Das *System Omega* (10 bis 14 kHz) ist in der Funktion dem System Decca ähnlich, ergibt aber aufgrund der sehr kleinen Radiofrequenz Reichweiten je nach Richtung bis zu 15000 km bei Ortungsgenauigkeiten von 1 bis 2 km. Omega wird sowohl in der Seefahrt als auch in der Luftfahrt genutzt.

Autonome Systeme der Funkortung. Funkortungssysteme, die keine funktechnischen Einrichtungen außerhalb der ortenden Stelle benötigen, werden als autonome Systeme bezeichnet. Zu unterscheiden sind Systeme, bei denen eine Eigenortung und solche, bei denen eine Fremdortung durchgeführt wird. Wenn die mit Eigenortung arbeitenden Systeme sich an Bord eines Schiffs, Luft- oder Raumfahrzeugs befinden, spricht man von *bordautonomen Systemen*. Dazu gehören radioastronomische Peiler (*Radio-Sextant*) und der *Doppler-Navigator*. Das in der Raumfahrt und auch in zunehmendem Maße in der Luftfahrt eingesetzte bordautonome Trägheitsnavigationssystem beruht auf den Newtonschen Gesetzen der Bewegung und gehört daher nicht zu den funktechnischen Ortungssystemen. Zur Fremdortung wird das Verfahren der passiven Rückstrahlung angewendet. Es wird allgemein als *Radar* (engl. radio detecting and ranging) bezeichnet; die genauere Bezeichnung wäre Primärradar. Gelegentlich wird dafür auch die Bezeichnung *Funkmeßtechnik* gebraucht.

Autonome Systeme zur Fremdortung. *Primärradar* beruht auf der gerichteten Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen höher Frequenz (hauptsächlich im Bereich zwischen 1 und 10 GHz, z. T. auch bis 40 GHz), ihrer Rückstrahlung an Inhomogenitäten im Ausbreitungsweg (Zielobjekte, wie Schiffe, Flugzeuge, Raketen, aber auch Bodenerhebungen, Gebäude, Regentropfen und Eiskristalle) und deren gerichteter Empfang. Aus der Laufzeit t_r der Welle bzw. Signale auf dem Wege vom Sender zum rückstrahlenden Objekt und zurück zum Empfänger ergibt sich die Entfernung $r = t_r/2c$, wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Die Winkelstellung der Antenne zum Zeitpunkt des Empfangs der rückgestrahlten Welle bzw. Signale gibt die Richtung an, in der sich das rückstrahlende Objekt befindet. Zur Erzielung einer hohen Richtwirkung werden Flächenantennen bevorzugt. Meist wird für Senden und Empfangen eine gemeinsame Antenne benutzt. Primärradargeräte lassen sich nach der Art der verwendeten Signalform in Impuls- und CW-Radar einteilen.

Impulsradar stand in der historischen Entwicklung des Radar am Anfang (Patent von *C. Hülsmeyer* 1904). Zuerst wurde es für militärische Zwecke, später auch für zivile Aufgaben eingesetzt. Es arbeitet mit sehr kurzen Impulsen (0,05 bis 2 μs) hochfrequenter Wellen und großen Impulsleistungen (50 kW bis 5 MW), die im Radarsender von einem Magnetron (vgl. 11.5.2.) in Verbindung mit einem Impulsmodulator erzeugt werden. Über einen Sende-Empfangs-Umschalter gelangen die Impulse zur Antenne und werden von ihr mit scharfer Richtwirkung abgestrahlt. Beim *Rundsichtradar* rotiert die

Antenne, so daß die Strahlung die gesamte Horizontalebene periodisch erfaßt. Die von Zielobjekten oder sonstigen Inhomogenitäten zurückgestrahlten Impulse werden von der Antenne wieder aufgefangen, gelangen über den Sende-Empfangs-Umschalter zum Empfänger, werden verstärkt und in die zur Auswertung geeignete Signalform umgesetzt (Abb. 11.4.6-6). Sie steuern dann die Helligkeit einer Elektronenstrahlröhre, deren Strahl periodisch und synchron zur Antennenrotation radial ausgelenkt wird. Damit kann aus der Lage des vom Strahl erzeugten Leuchtpunkts auf dem Schirm der Elektronenstrahlröhre Entfernung und Azimut des betreffenden Zielobjekts ermittelt werden. Das Impulsradar wird in der See-, Luft- und Raumfahrt angewendet. Für große Reichweiten benutzt man weniger hohe Frequenzen (1,3 GHz und geringer) und sehr große Impulsleistungen (2 bis 5 MW). Zur Erzielung hoher Winkel- und Entfernungsauflösungen sind dagegen möglichst hohe Frequenzen (25 bis 40 GHz) und sehr kurze Impulse (bis herab zu 0,05 μs) zu wählen. Entsprechend der gestellten Aufgabe gibt es in der Luftfahrt Luftstraßenüberwachungs-, Flughafenrundsicht-, Präzisionsanflug-, Rollfeld-, Bordradar; in der Seefahrt Schiffskollisionsschutz-, Küsten-, Hafenradar; in der Meteorologie Wetter-, Windradar; in der Raumfahrt Zielverfolgungsradar und für militärische Aufgaben Feuerleitradar. – Auch der *Impulshöhenmesser*, der in der Luftfahrt benutzt wird, stellt ein Impulsradar dar, wobei als Rückstrahlobjekt der Erdboden dient.

CW-Radar ist der Oberbegriff aller Radartypen, die mit kontinuierlichen hochfrequenten Wellen arbeiten (Frequenzbereich je nach Art und Aufgabe zwischen einigen 100 MHz und 10 GHz). Es gibt 2 Verfahren: die Sendefrequenz bleibt konstant oder die Sendefrequenz wird periodisch um einen Mittelwert verändert, sog. Frequenzmodulation. CW-Radar mit konstanter Frequenz wird angewendet z. B. zur Messung der relativen Geschwindigkeit zwischen Radargerät und rückstrahlendem Objekt (*Geschwindigkeitsradar*) oder zur Feststellung der Bewegung eines rückstrahlenden Objekts (*Annäherungswarnradar*, *Alarmradar*). CW-Radar mit Frequenzmodulation dient zur Bestimmung von Abständen zwischen Radargerät und Objekt (*Kollisionsradar*) bzw. zwischen Radargerät und Erdboden (*FM-CW-Funkhöhenmesser*). Bei der Messung der relativen Geschwindigkeit und Bewegungsbestimmungen wird der Doppler-Effekt ausgenutzt, durch den die Empfangsfrequenz gegenüber der Sendefrequenz verändert wird.

Autonome Systeme zur Eigenortung. Der *radioastronomische Peiler* ist eine Empfangsanlage im GHz-Bereich mit einer Antenne hoher Richtwirkung, ähnlich dem Empfangsteil einer Radaranlage. Es wird die Richtung ermittelt, aus der eine Strahlung im Bereich der sog. funktechnischen Wellen empfangen wird, deren Quellen sich an bestimmten Punkten am Himmel befinden. Da diese Punkte bekannt sind, läßt sich damit eine Ortung durchführen, die der astronomischen Ortung nach sichtbaren Sternen gleicht. Die Empfangsanlage bezeichnet man meist mit *Radio-Sextant*.

Der *Dopplernavigator* ist eine aus Dopplerradar, Navigationsrechner und Anzeigeeinrichtungen bestehende Bordanlage für Luftfahrzeuge. Das *Dopplerradar* ist ein Primärradar, bei dem durch Messen der Frequenz der vom Erdboden zurückgestrahlten Welle die Geschwindigkeit des sich bewegenden Luftfahrzeugs bestimmt wird. Ist die Frequenz des Sendesignals gleich f_s, dann weicht die Frequenz des empfangenen Signals f_e um den Betrag der Dopplerfrequenzverschiebung $f_d = (2 f_s/c)\, v \cdot \cos\gamma$ ab. Dabei ist v die Geschwindigkeit des Luftfahrzeugs, γ der Strahlungswinkel zum Erdboden und $v \cdot \cos\gamma$ die Relativgeschwindigkeit des Luftfahrzeugs in Richtung der Strahlung. Da f_s und γ bekannt sind, kann v durch Messen von f_d bestimmt werden. Die Integration von v über die Zeit t ergibt den vom Luftfahrzeug in dieser Zeit zurückgeleg-

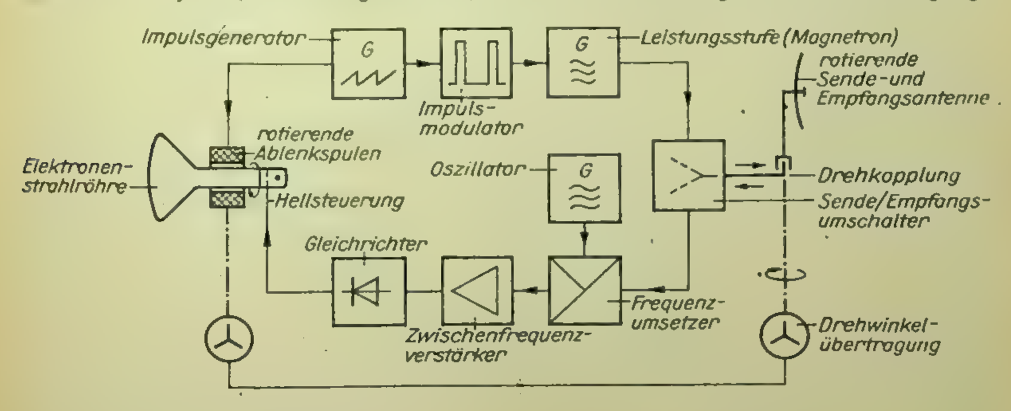


Abb. 11.4.6-6 Funktionsschaltbild eines Primärimpulsradargeräts (Rundsichtradar)

ten Weg $s = \int_{t=0}^{t} v\,dt$. Die Geschwindigkeit ist eine gerichtete Größe, die durch 3 Komponenten angegeben werden kann. Diese 3 Komponenten werden durch mindestens drei Radarstrahlen bestimmt; aus technischen Gründen wählt man meist vier. Mit den durch Integration gewonnenen Wegkomponenten wird bei bekannten Koordinaten des Startorts der momentane Standort berechnet und in geographischen Koordinaten angezeigt. Dopplernavigatoren kommen in der Luftfahrt vor allem dort zum Einsatz, wo durch das Fehlen von Bodenanlagen keine Möglichkeit zur sonstigen Ortung besteht, z. B. über den Ozeanen und den Polargebieten.

Funkortungssysteme für Anflug- und Landenavigation. Anflug und Landung erfordern spezielle Ortungs- und Navigationshilfen. Geeignete Systeme müssen die Möglichkeit zur Bestimmung der momentanen Lage in Azimut, Elevationswinkel und Entfernung bis zum Aufsetzpunkt bieten. Für die zivile Luftfahrt sind 2 Systeme standardisiert: das mit Eigenortung arbeitende *I*nstrumenten-*L*ande-*S*ystem (*ILS*) und das mit Fremdortung arbeitende Anflugradarsystem (*GCA*, ground-controlled-approach = vom Boden kontrollierter Anflug).

Instrumenten-Lande-System. Es besteht aus den Sendeanlagen am Boden (Funkfeuer) und der Empfangsanlage an Bord. Die Sendeanlagen sind Landekurssender, Gleitwegsender und Markierungsfunkfeuer (Einflugzeichen). Die Sendeanlagen besitzen spezielle Antennenanlagen zur Erzeugung bestimmter Richtcharakteristiken (vgl. 11.4.7.). Der *Landekurssender* (108 bis 112 MHz) erzeugt eine vertikale Leitebene (Landekursebene), der *Gleitwegsender* (328 bis 336 MHz) eine um 2,5° geneigte horizontale Leitebene (Gleitwegebene) und die *Einflugzeichen* (75 MHz) je eine senkrecht nach oben gerichtete Strahlungskeule (Abb. 11.4.6-7). Mit den Bordempfangsgeräten werden die Signale des Landekurs- und Gleitwegsenders empfangen und zur Betätigung der Anzeige eines *Kreuzzeigerinstruments* benutzt. Erfolgt der Anflug in der richtigen Weise, stehen die beiden Zeiger senkrecht aufeinander, bei fehlerhaftem Anflug zeigen sie Ausschläge und geben dem Piloten an, nach welcher Richtung er steuern muß, um auf den richtigen Anflug zu kommen.

Anflug-Radar-System. Es besteht aus dem *Flughafenrundsichtradar* (2,8 GHz) zur Überwachung des Luftraums in der Umgebung des Flughafens und dem *Präzisions-Anflug-Radar* (*PAR*, 9 GHz). Das PAR hat 2 Antennen, die abwechselnd mit dem Sender und Empfänger verbunden werden. Die eine Antenne dient zur Erfassung der Horizontalebene (Azimut, AZ), die andere für die Vertikalebene (Elevation, EL) jeweils in einem Sektor beiderseits des idealen Anflugwegs. Die Anzeige der AZ- und EL-Signale erfolgt auf einem gemeinsamen Bildschirm einer Elektronenstrahlröhre (Abb. 11.4.6-8). Aus der Lage der Leuchtpunkte auf dem Bildschirm erkennt der Radarkontrolleur, ob der Anflug richtig verläuft. Bei Abweichungen erteilt er über die bestehende UKW-Funksprechverbindung dem Piloten Anweisungen zur Flugbahnkorrektur.

Automatische Anflug- und Landesysteme beruhen funktechnisch auf Verfahren, die dem ILS oder GCA ähnlich sind. Die Betätigung der Steuerungsorgane des Luftfahrzeugs erfolgt dann automatisch aufgrund der funktechnisch gewonnenen Informationen.

Richtfunktechnik. Die Technik der drahtlosen Übertragung von Nachrichten (Fernsehprogramme, Bündel von Fernsprech- und Fernschreibkanälen) mit elektromagnetischen Wellen hoher Frequenz (200 MHz bis 20 GHz), die mit ausgeprägter Richtwirkung gesendet und empfangen werden, wird als Richtfunktechnik bezeichnet. Die Richtwirkung wird durch Antennen

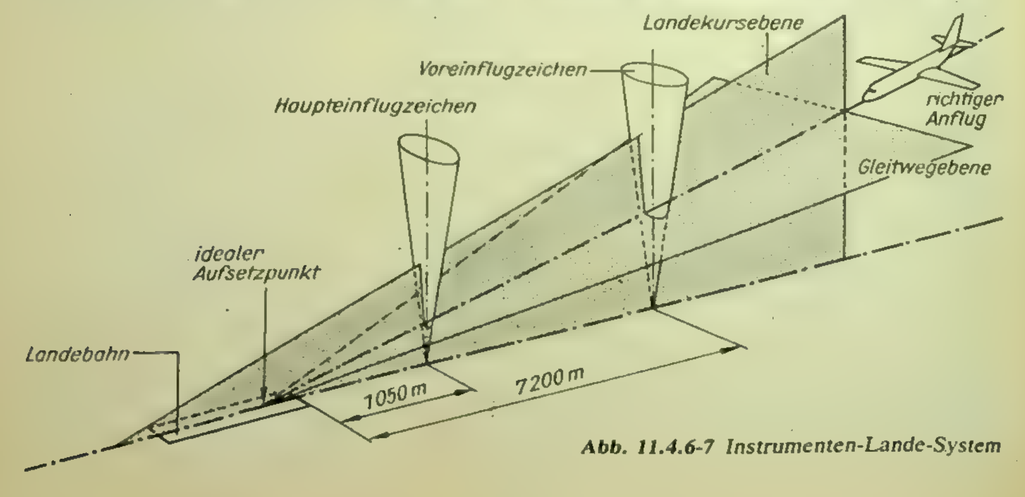


Abb. 11.4.6-7 Instrumenten-Lande-System

(*Richtantennen*) erzielt, deren Abmessungen groß zur Wellenlänge sind. Die Richtwirkung steigt mit der Antennenfläche und mit der Frequenz. Um die Antennenabmessungen in erträglichen Grenzen zu halten, werden möglichst hohe Frequenzen gewählt. Wellen mit Frequenzen > 100 MHz breiten sich um so mehr nach optischen Gesetzen aus, je höher die Frequenz ist (*quasioptische Ausbreitung*). Mit der Richtwirkung erreicht man, daß die vom Sender erzeugte Energie nur in die Richtung ausgestrahlt wird, in der sich der Empfänger befindet, eine sog. *Punkt-zu-Punkt-Verbindung*. Damit können Richtfunkverbindungen mit verhältnismäßig geringen Sendeleistungen arbeiten. Wegen der quasioptischen Ausbreitung der Wellen müssen Sende- und Empfangsantenne sich „sehen", d. h. die Verbindungslinie muß frei von Hindernissen sein. Infolge der Erdkrümmung ist es deshalb erforderlich, daß Sende- und Empfangsantenne möglichst hoch stehen. Je größer die Höhen sind, desto größer ist die überbrückbare Entfernung.

Terrestrische Richtfunkverbindung. Die Verbindung verläuft längs der Erdoberfläche jeweils von einem Sender zu einem Empfänger. Befinden sich Sende- und Empfangsantenne auf Masten oder Türmen (Richtfunktürme von ≈ 50 m Höhe, so lassen sich im ebenen Gelände mit einer direkten Verbindung (Funkfeld) ≈ 50 km überbrücken. Zur Überbrückung größerer Entfernungen müssen Relaisstellen eingefügt werden, die nur die Aufgabe haben, die empfangenen Signale zu verstärken und dann wieder auszusenden.

Richtfunkverbindungen arbeiten je nach Verwendungszweck in einem Frequenzband zwischen 200 MHz und 20 GHz. In der Praxis werden Entfernungen bis zu einigen 10^3 km überbrückt, wobei die Anzahl der Relaisstellen der Entfernung proportional ist. Übertragen werden je Radiofrequenzkanal max. 2700 Ferngespräche oder 1 Fernsehprogramm. Meist laufen mehrere Radiofrequenzkanäle (bis zu 8) parallel.

Satelliten-Richtfunkverbindung. Die Verbindung entspricht einer terrestrischen Richtfunkverbindung mit nur einer Relaisstelle, d. h. mit 2 Funkfeldern. Die Relaisstelle befindet sich in sehr großer Höhe in einem Fernmeldesatelliten (Abb. 11.4.6-9). Es gibt Satelliten, die auf langgestreckten elliptischen Bahnen um die Erde laufen (umlaufende Satelliten, z. B. Typ Molnija), und Satelliten, die auf einer äquatorialen Kreisbahn in einer Höhe von 36000 km synchron mit der Erde umlaufen (*Synchronsatelliten*) und damit in bezug zu einem Punkt auf der Erde stillstehen (*geostationärer Satellit*, z. B. Intelsat). Durch die große Höhe der im Satelliten befindlichen Relaisstelle werden damit Entfernungen bis zu ≈ 15000 km zwischen der senderseitigen und empfängerseitigen Erdfunkstelle überbrückt. Mit einer Hintereinanderschaltung mehrerer Satelliten-Richtfunkverbindungen läßt

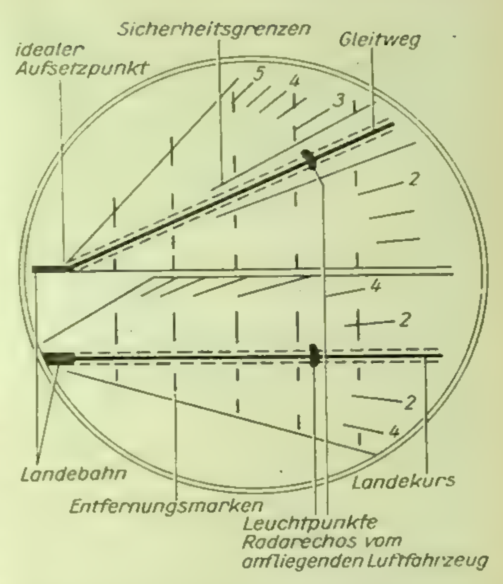


Abb. 11.4.6-8 *Anzeige des Präzisions-Anflug-Radars: oberer Teil Elevationsbereich, unterer Teil Azimutbereich*

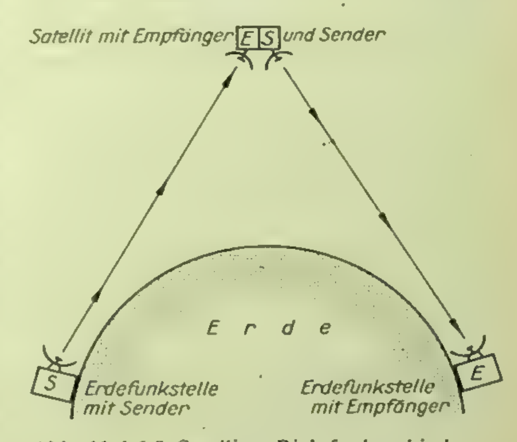


Abb. 11.4.6-9 *Satelliten-Richtfunkverbindung*

sich der gesamte Erdumfang überbrücken. Mit den in Betrieb befindlichen Satelliten-Richtfunkverbindungen, die im Frequenzbereich von 4 und 6 GHz arbeiten, sind heute die meisten Länder miteinander verbunden. Übertragen werden in erster Linie Ferngespräche und z. T. Fernsehprogramme.

Streustrahl- oder Scatter-Richtfunkverbindung. Die Verbindung beruht auf der Streustrahlung (diffuse Reflexion, engl. scattering) der vom Sender ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen, die an den in der Troposphäre befindlichen Inhomogenitäten erfolgt. Die Streustrah-

lung wird von der jenseits des Horizonts in einer Entfernung von ≈ 300 bis 600 km stehenden Empfangsstation aufgenommen (daher auch die Bezeichnung „Überhorizont-Richtfunkverbindung"). In der Praxis werden Frequenzbereiche bei 400 MHz und 2 GHz bevorzugt. Übertragen werden je nach Verwendungszweck 60 bis 300 Ferngespräche.

11.4.7. Antennen

Wirkungsprinzip. Die *Antenne* ist eine Einrichtung, die leitungsgeführte hochfrequente Energie in Strahlungsenergie (*Sendeantenne*) oder umgekehrt Strahlungsenergie in leitungsgeführte Energie (*Empfangsantenne*) umwandelt. Beide Fälle sind äquivalent und es gilt das Reziprozitätsgesetz (Umkehrbarkeit von Sende- und Empfangsantenne). Unterschiede in der technischen Ausführung sind im wesentlichen durch die zu übertragende Leistung und durch Betriebsbedingungen begründet.
Im Fernfeld, d. h. in einer Entfernung, die groß ist zur Antennenabmessung, erzeugt jede sinusförmig erregte Antenne eine elektromagnetische Welle mit der *elektrischen Feldstärke E* und der *magnetischen Feldstärke H*, die beide senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen. Die Richtung von E wird als *Polarisationsrichtung* bezeichnet. Es gibt lineare, elliptische und zirkulare Polarisation. Bei Antennen in Erdnähe unterscheidet man entsprechend der Orientierung von E horizontale und vertikale Polarisation. Eine Antenne erzeugt im Fernfeld eine Feldstärke, deren Betrag bei gleichbleibender Entfernung i. allg. vom Winkel in der Horizontal- und Vertikalebene abhängt. Die Feldstärke in Abhängigkeit vom Winkel, bezogen auf den Maximalwert, wird *Richt-* oder *Antennencharakteristik* genannt, die grafische Darstellung *Richtdiagramm*. Hat die Feldstärke bei gleichbleibender Entfernung im Raum einen konstanten Wert, so wird diese Antenne als *Kugelstrahler* bezeichnet, hat die Feldstärke in der Horizontalebene einen konstanten Wert, so gilt sie als *Rundstrahler*. Weist die Antenne eine Feldstärke mit ausgeprägter Winkelabhängigkeit auf, ist sie ein *Richtstrahler* oder eine *Richtantenne*.

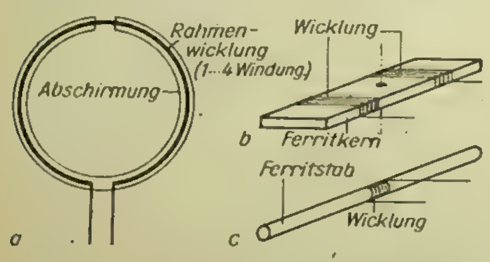


Abb. 11.4.7-1 Rahmenantenne: a kreisförmiger Rahmen mit Abschirmung gegen elektrische Feldkomponente, b Ferritrahmen für Radiokompaß, c Ferritstabantenne für Rundfunkempfänger

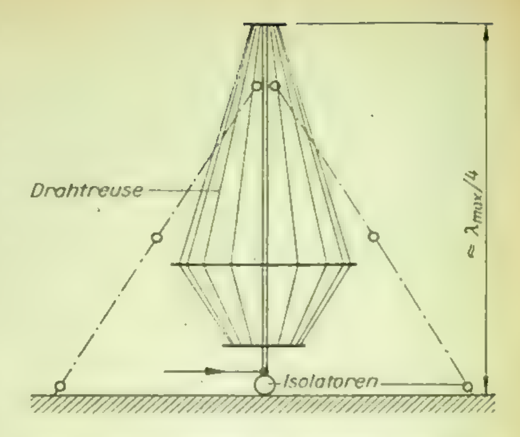


Abb. 11.4.7-2 Senkrechte Reusenantenne

Bei *Linearantennen* ist die Ursache der Abstrahlung der hochfrequenten Energie ein linienförmiger elektrischer oder magnetischer Strombelag. *Flächenantennen* haben flächenhaft ausgedehnte Leiter und flächenhaft verteilte Ströme. In beiden Hauptgruppen gibt es eine große Anzahl von Antennenarten, die im einzelnen durch bestimmte elektrische Eigenschaften gekennzeichnet sind; entscheidend ist dabei der Wellenbereich, in dem die betreffende Antenne betrieben werden soll.

Antennen für den Lang- und Mittelwellenbereich. Selbstschwingende Rohr- und Stahlgittermaste, deren Höhe in der Größenordnung von $\lambda/4$ (λ = Wellenlänge) liegt, werden bevorzugt als Sendeantennen verwendet und erzeugen eine Rundstrahlung. Mit einer aus 2 oder mehr Masten bestehenden Antennenanlage läßt sich eine Vorzugsstrahlungsrichtung herstellen. Zur Verringerung der Masthöhe (> 100 m) wird an der Spitze des Mastes ein kapazitives Element angebracht, z. B. in Form eines Schirms aus Draht, eine sog. *kapazitiv belastete Vertikalantenne*. Eine vereinfachte Form ist die Drahtantenne in T-Form, die vor allem als Empfangsantenne benutzt wird. Die kreis- oder rechteckförmige *Rahmenantenne* mit einer (Abb. 11.4.7-1a) oder mehreren Windungen dient aufgrund ihrer Richtwirkung (Doppelkreischarakteristik) in erster Linie als Peilantenne, der *Ferritrahmen* (Abb. 11.4.7-1b) mit seinen geringen Abmessungen als Peilantenne beim Radiokompaß. Eine vereinfachte Form des Ferritrahmens ist die *Ferritstabantenne*, die vor allem in tragbaren Rundfunkempfängern verwendet wird (Abb. 11.4.7-1c).

Antennen für den Kurzwellenbereich. Horizontale symmetrische Drahtantennen der Län-

ge λ/2 (*Halbwellendipol*) (vgl. Abb. 11.4.7-3) und λ (*Ganzwellendipol*) mit Einspeisung in der Mitte werden sowohl als Sende- als auch als Empfangsantennen eingesetzt. Die Form der vertikalen Richtcharakteristik hängt vom Abstand der Antenne vom Erdboden ab. Die senkrecht stehende *Reusenantenne* (Abb. 11.4.7-2) erzeugt Rundstrahlung. Die ähnlich einer Rahmenantenne wirkende *Adcock-Antenne* dient als Peilantenne, wobei meist 4 oder 6 Maste verwendet werden.

Antennen für den Ultrakurzwellenbereich. Horizontale und vertikale Halbwellen- und Ganzwellendipole sowie Gruppen ohne und mit Reflektoren sind im UKW-Bereich die am meisten verwendeten Antennen. Der *Schlitzstrahler* (Abb. 11.4.7-3) wirkt ähnlich wie ein stabförmiger Dipol. Aus dem Dipol bzw. Schlitzstrahler abgeleitet sind die sog. *Elementstrahler*, wie Dipolrahmen, Drehkreuz, Schmetterlingsstrahler, Schlitzstrahlerpaar, Vierer- und Achter-Dipolfelder. Die Elementstrahler dienen zum Aufbau von umfangreichen Antennen für UKW-Rundfunk- und Fernsehsender. – Die aus Halbwellendipol, Direktor- und Reflektorstäben, meist als „Elemente" bezeichnet, zusammengesetzte *Yagiantenne* (Abb. 11.4.7-4) ist konstruktiv sehr einfach und daher billig; sie wird in großem Umfang als UKW-Rundfunk- und Fernsehempfangsantenne benutzt.

Antennen für den Mikrowellenbereich. Im Mikrowellenbereich wird in fast allen Anwendungsfällen eine Antenne mit hoher Richtwirkung benötigt. Diese Forderung läßt sich am besten mit Flächenantennen erfüllen, bei denen die Richtwirkung proportional der Antennenfläche ist. Die einfachste Flächenantenne ist der trichterförmig aufgeweitete Rechteck- oder Rundhohlleiter, *Trichter-* oder *Hornstrahler* genannt.

Durch Anbau einer dielektrischen Verzögerungslinse oder Parallelplatten-Beschleunigungslinse kann die Richtwirkung erheblich gesteigert werden. Bessere Eigenschaften hat die *Spiegelantenne*. Sie besteht aus Primärstrahler (Halbwellendipol, Trichter- oder Hornstrahler, Schlitzstrahler) und einem parabolischen Metallspiegel. Der Primärstrahler befindet sich im Brennpunkt des Rotationsparaboloids. Die Richtwirkung ist um so größer, je größer der Durchmesser gegenüber der Wellenlänge ist. Anstelle des Rotationsparaboloids können auch symmetrische und unsymmetrische Ausschnitte von ihm verwendet werden. Dabei ist die Richtwirkung in der Ebene am größten, in der die Antenne die größte Ausdehnung hat. Eine besondere Spiegelantenne ist die *Hornparabolantenne*, die aus Trichterstrahler und einem mechanisch mit ihm verbundenen Teil eines Rotationsparaboloids besteht (Abb. 11.4.7-5). Zu den Flächenantennen gehören auch Oberflächenwellenantennen, wie der dielektrische Strahler (*Stielstrahler*) und die *Wendelantenne*.

11.4.8. Elektroakustik

Die Elektroakustik befaßt sich mit der Umwandlung von Schall- in elektrische Schwingungen und umgekehrt mittels elektroakustischer Wandler sowie mit der Schallspeicherung. Der hörbare Bereich der Schallschwingungen beträgt ≈ 16 Hz bis 20 kHz.

Schallempfänger. Zur Umwandlung von Schall- in elektrische Schwingungen werden Schallempfänger (*Mikrofone*) benutzt.

Das *Kondensatormikrofon* wird vor allem im Studio, aber auch für Meßzwecke, eingesetzt. Unter dem Einfluß einer Schalldruckschwankung bewegt sich eine dünne Membran, die eine

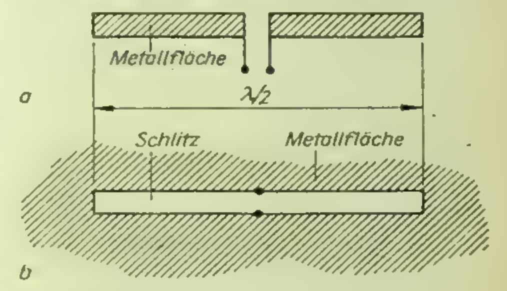


Abb. 11.4.7-3 Duale Antennen: a λ/2-Dipol, b λ/2-Schlitz

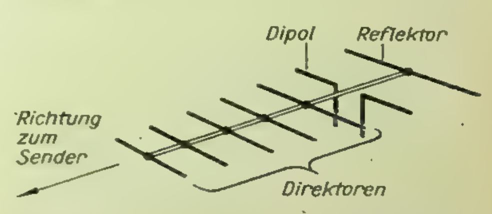


Abb. 11.4.7-4 Yagiantenne als Empfangsantenne

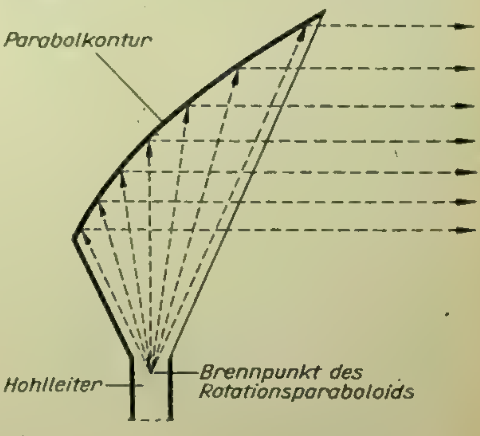


Abb. 11.4.7-5 Hornparabolantenne

Elektrode eines Kondensators darstellt, von einer festen Gegenelektrode. Dieser Kondensator liegt sehr hochohmig (≈ 60 MΩ) an einer Gleichspannungsquelle (≈ 100 V). Durch die Abstandsänderung zwischen Membran und Gegenelektrode ändert sich die Kapazität des von ihnen gebildeten Kondensators und damit die an ihm liegende Spannung. Der dabei auftretende Strom ruft einen Spannungsabfall am Widerstand hervor. Die Wechselspannung wird in einem nachfolgenden Halbleiterverstärker verstärkt. Vorteile des Kondensatormikrofons sind vor allem sein geradliniger Frequenzgang und seine Unempfindlichkeit gegenüber magnetischen Feldern.

Das *dynamische Mikrofon* wird sowohl im Studio als auch bei Reportagen eingesetzt. Die Umwandlung von Schalldruckschwankungen in eine Wechselspannung erfolgt hier durch die Bewegung eines Leiters in einem homogenen Magnetfeld. Man unterscheidet 2 Varianten: 1. Beim *Tauchspulmikrofon* bewegt sich im Schallfeld eine auf einer leichten Membran aufgeklebte Spule im Ringspalt eines kräftigen Dauermagneten. 2. Beim *Bändchenmikrofon* schwingt ein zwischen den langgestreckten Polen eines Dauermagneten aufgehängtes dünnes Aluminiumbändchen. Die in ihm induzierte Spannung wird mit einem Übertrager hochtransformiert. Vorteile des dynamischen Mikrofons sind Wegfall einer Stromversorgung sowie Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen, Temperaturschwankungen und hochfrequenten Beeinflussungen.

Für die Heimelektronik wird häufig das *Kristallmikrofon* verwendet. Dabei wird der piezoelektrische Effekt ausgenutzt (bei mechanischer Beanspruchung des Kristalls treten an seinen Endflächen elektrische Ladungen auf). Man verwendet Plättchen von ≈ 0,3 mm Dicke aus Seignettesalzkristallen (Kaliumnatriumtartrat), die auf beiden Seiten mit einem Stanniolbelag versehen werden. Häufig werden zur Spannungserhöhung mehrere Plättchen im Mikrofon vereinigt.

Das *drahtlose Mikrofon* (auch Bühnenmikrofon genannt) enthält neben einem Mikrofon hoher Qualität noch einen kleinen UKW-Sender, mit dessen Hilfe eine drahtlose Übertragung mit begrenzter Reichweite bei Studioqualität möglich ist.

Schallsender benutzt man zur Umwandlung von elektrischen Schwingungen in Schallschwingungen. Diese bezeichnet man in der Elektroakustik als *Lautsprecher*.

Dynamische Lautsprecher sind am verbreitetsten. Auf einer Konusmembran ist eine zylindrische Tauchspule befestigt, die sich im Ringspalt eines topfförmigen Dauermagneten hin und her bewegen kann. Fließt ein Wechselstrom durch die Spule, so wird durch den Stromfluß im Magnetfeld eine Kraft erzeugt, die die Membran im Rhythmus der tonfrequenten Schwingungen in Bewegung setzt und die erwünschte Schallschwingung in den Raum abstrahlt. Vorteil des dynamischen Lautsprechers ist die verzerrungsarme Übertragung eines relativ breiten Frequenzbereichs.

Elektrostatische Lautsprecher werden speziell zur Wiedergabe hoher Töne verwendet. Zwischen einer Membran und 2 zu beiden Seiten angebrachten perforierten Gegenelektroden liegt eine Gleichspannung fest an. Diese erzeugt ein elektrostatisches Feld, das sich durch eine überlagerte Wechselspannung ändert und so die Membran zum Schwingen bringt.

Zur Übertragung eines breiten Frequenzbands (z. B. 40 Hz bis 15 kHz) werden häufig mehrere Lautsprecher zu einem *Breitbandlautsprechersystem* oder zu einer *Lautsprecherkombination* zusammengefaßt. Jedes Teilsystem überträgt dabei einen Teil des gesamten Frequenzbereichs.

Schallspeicherung. In elektrische Schwingungen umgewandelte Schallschwingungen können nach verschiedenen Verfahren gespeichert werden.

Beim *Lichttonverfahren* wird der Wechselstrom in Helligkeitsschwankungen einer Lichtquelle umgesetzt und dann auf einer Randspur des Kinofilms aufgebracht. Dieses Verfahren ist in der Qualität sehr begrenzt.

Beim *Nadeltonverfahren* wird die elektrische Schwingung im Seitenschriftverfahren in Form einer spiralförmigen Rille in der sog. Schallplatte gespeichert. Wegen des apparativen Aufwands ist dieses Verfahren für die Heimaufnahme nicht geeignet. Die heutigen Langspielplatten aus unzerbrechlichem Plast haben einen beachtlichen Qualitätsstand und ermöglichen auch stereofone Wiedergabe.

Das *Magnetbandverfahren* ist im Studio und in der Heimelektronik eindeutig dominierend. Aufnahme und Wiedergabe sind bequem durchzuführen. Je nach Ausführung des Geräts sind hohe Qualitätsansprüche auch für Stereofonie erfüllbar.

Das Magnetband besteht aus Kunststoff (Polyester) mit einer Breite von 6,35 mm und Dicken von 18 bis 50 μm, das eingelagerte magnetische Material ist i. allg. Eisenoxid Fe_2O_3. Dieses Magnetband läuft mit konstanter Geschwindigkeit am Aufnahmekopf vorbei. Der Aufnahmekopf erzeugt im Rhythmus der zu speichernden Schallschwingungen in Verbindung mit einer HF-Vormagnetisierung im vorbeilaufenden Magnetband ein veränderliches Magnetfeld, was gespeichert bleibt. Bei der Wiedergabe läuft das „bespielte" Band am Wiedergabekopf vorbei und induziert so in der Spule des Wiedergabekopfes die erwünschte Wechselspannung, die verstärkt wird. Mittels eines Löschkopfs kann das Band jederzeit „gelöscht" werden, d. h. die gespeicherte Information wird entfernt;

danach kann es wieder neu bespielt werden. Als Bandgeschwindigkeiten sind üblich 38,1, 19,05, 9,5, 4,76 und 2,38 cm/s. Zur besseren Ausnutzung des Magnetbands sind die Geräte heute meist für Mehrspurbetrieb eingerichtet. Mitunter sind auch Einrichtungen, z. B. zur Überblendung Sprache/Musik, zur Mithörkontrolle bei der Aufnahme und zum automatischen Abschalten des Geräts bei Bandende, eingebaut.
Das klassische Magnetbandgerät ist ein Spulengerät, d. h. das Magnetband ist auf Kunststoffspulen genormter Größen aufgewickelt. Für die Heimelektronik hat sich in steigendem Maße das *Kassetten-Magnetbandgerät* (*Kassettenrecorder*) eingebürgert. Seine Vorteile liegen in der besonders einfachen Bedienung durch Laien. Die Kassette kann durch Fingerdruck eingelegt bzw. ausgewechselt werden. Das nur 3,81 mm breite Band ist in einer international vereinheitlichten Kassette untergebracht, die Bandgeschwindigkeit beträgt 4,76 cm/s.

11.4.9. Signal- und Alarmanlagen

Signalanlagen sind Fernmeldeanlagen, die einfache Zeichen optischer oder akustischer Art auslösen. Art und Form des dabei übertragenen Stroms spielen im Unterschied zur Fernmeldetechnik keine Rolle.
Klingelanlagen haben im einfachsten Falle einen *Rasselwecker* (*W*), der durch Druck auf eine *Taste* (*T*) betätigt wird. In *Gegenrufanlagen* kann man eine Spannungsquelle oder Batterie (*B*) mit 3 Leitungen (L_1, L_2, L_3) oder 2 gleichpolig geerdete Quellen mit einer Leitung verwenden (Abb. 11.4.9-1).
Lichtrufanlagen bestehen auf einem Tableau mit mehreren *Leuchtfeldern* (*Lichtruftafel*), das mit Rufknöpfen in ebensovielen Räumen verbunden ist. Bei Betätigung eines Rufknopfs leuchtet das zugehörige Feld auf. Oft befindet sich an jeder Rufstelle eine *Beruhigungslampe*, mit deren Aufleuchten man den Empfang des Rufes bestätigen kann. Lichtrufanlagen werden in Hotels,

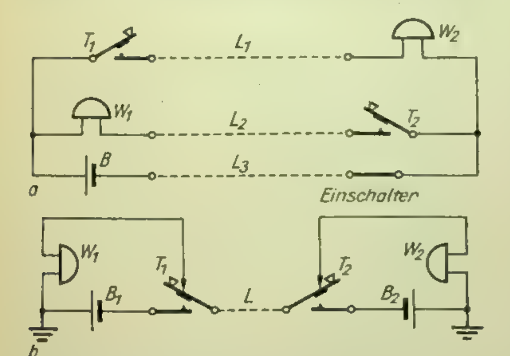


Abb. 11.4.9-1 Gegenrufklingelanlage: a mit 3 Leitungen und b mit 1 Leitung

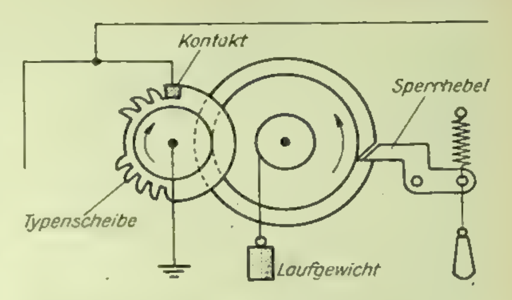


Abb. 11.4.9-2 Schematischer Aufbau eines Feuermelders (mit der Nummer 34)

Krankenhäusern u. ä. bevorzugt, weil sie geräuschlos sind.
Bei *Personenrufanlagen* sind in mehreren Räumen Lichtruftafeln angebracht, auf denen ein der gesuchten Person zugeordnetes Leuchtfeld oder eine Ziffernkombination so lange aufleuchtet, bis der Gesuchte sich meldet. Akustische Signale können die Lichtruftafel zusätzlich unterstützen.
Alarmanlagen, auch *Überwachungsanlagen* genannt, dienen dem Schutz von Menschen und Sachwerten gegen Feuer, Rauch, Schadgase, Wasser, Einbruch, unbefugtes Bedienen usw. Sie bestehen aus einem Überwachungs- und/oder Auslösegerät, einer Übertragungseinrichtung und dem Alarmgerät sowie oft einer Steuerungsanlage, die automatisch die notwendigen Maßnahmen einleitet. Die Signalauslösung erfolgt entweder von Hand (z. B. Feuermelder) oder automatisch durch entsprechende Fühler.
Feuermeldeanlagen. Bei *öffentlichen Feuermeldern* wird durch Knopfdruck ein Sperrhebel ausgeklinkt und durch ein Laufgewicht eine Typenscheibe in Drehbewegung versetzt (Abb. 11.4.9-2). Letztere hat Einschnitte, die eine bestimmte Zahl (Nummer des Melders) darstellen und beim Vorbeigleiten an einem Kontakt den Ruhestromkreis der Melderschleife entsprechend oft unterbrechen. In der Feuermeldezentrale werden dadurch Schrittschaltwerke (Drehwähler) und durch diese Relais in Betrieb gesetzt, die auf einem Leuchttableau die Nummer und z. T. den Standort des Feuermelders anzeigen. Die Nummer des Melders sowie Uhrzeit und Datum werden außerdem von einem Drucker registriert. Jede Meldung erfolgt zweimal.
Moderne Feuermelder sind meist mit einem *Polizeimelder* kombiniert, der nach dem selben Prinzip arbeitet (*Polizeirufanlage*). Bei Betätigen eines der beiden Melder wird in dem gemeinsamen Gehäuse ein Fernsprecher freigegeben, über den der Meldende bzw. später Feuerwehr oder Polizeistreife mit der jeweiligen Zentrale sprechen können.

Feueralarmanlagen baut man vor allem in feuergefährdete Räume (z. B. Laderäume von Schiffen, Theater) oder solche mit wertvollem Inhalt (z. B. Tresore, Museen) ein. Sie zeigen über Temperaturfühler das Überschreiten einer bestimmten Temperatur an (*Temperaturwarnanlage*) oder weisen als *Rauchmeldeanlage* durch Lichtschranken die Lufttrübung bei Rauchentwicklung nach, wobei ebenso wie im ersten Fall ein Signal, gegebenenfalls auch automatisch eine Berieselungsanlage, ein Wasservorhang o. a. ausgelöst wird. Schadgase, wie Kohlenmonoxid, weist man über die selektive Infrarotabsorption mit einer speziellen Lichtschranke nach.

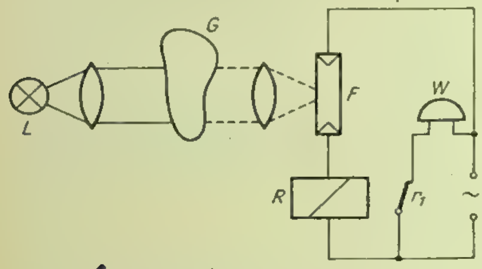


Abb. 11.4.9-3 Alarmlichtschranke

Bei automatischer Signalauslösung werden häufig *Lichtschranken* benutzt. Abb. 11.4.9-3 zeigt eine Alarmlichtschranke in Ruhestromschaltung. Wenn ein Gegenstand G den durch Linsen von der Lampe L auf den Fotowiderstand F fokussierten Lichtstrahl unterbricht, wird der Fotowiderstand hochohmig, das Relais R fällt ab und schaltet mit dem Kontakt r_1 den Wecker W ein.

Raumschutzanlagen. *Türverriegelungsanlagen* schließen ferngesteuert auf ein Alarmzeichen, z. B. bei Überfall, die Ausgangstüren eines Gebäudes und verriegeln sie elektromagnetisch. Vielfältige *Sicherungsanlagen* werden gegen *Einbruch* benutzt: *Lichtsignalanlagen* verwenden Lichtschranken, oft als *Infrarotlichtschranke* oder als *Strahlengatter*, d. h. als Mehrfachlichtschranke, die häufig nur je einen Geber und Empfänger, aber viele Reflektoren aufweist. Spezielle Lichtschranken mit Personenkennung lösen dadurch nicht aus, weil der Betreffende einen kleinen Sender mit sich führt, der das Alarmgerät umschaltet. *Berührungsschalter*, wie Kontaktschwellen und -matten und Kontakte an Türen, Fenstern und Fußböden, lösen ebenso Alarm aus wie schmale leitfähige Beläge auf Glasscheiben usw. *Geräuschmeldeanlagen* arbeiten mit Mikrofonen oder mit einem Stromkreis, der über eine Stahlmembran und Kontaktstifte geschlossen ist und bei Geräusch durch Schwingen der Membran geöffnet wird. Derartige Ruhestromschaltungen sind besonders zuverlässig. *Näherungsschalter* reagieren berührungslos auf Menschen und Gegenstände, die das umgebende elektromagnetische Feld beeinflussen. *Elektronische Schlösser* dienen gleichzeitig als Warn- und Sicherungsanlagen. Sie enthalten Zugmagneten, die die mechanische Verriegelung sperren oder freigeben. Die Ansteuerung der Magnete erfolgt auf vielfältige Weise. Große Sicherheit bietet z. B. die Steuerung durch mehrere Relais, die so geschaltet sind, daß auf einem Tastenfeld eine bestimmte Zahl von Tasten in einer vorgegebenen Kombination und/oder einer bestimmten Reihenfolge betätigt werden müssen, um die Verriegelung zu lösen; jede Falschbedienung blockiert die Sperre und gibt Alarm.

Zur Erhöhung der Sicherheit, z. B. von Schneide- und Stanzmaschinen, werden Lichtschranken oder Näherungsschalter eingesetzt. *Autowarnanlagen* verwenden versteckte Schalter oder Pendel mit Kontakten, die bei unbefugtem Starten z. B. die Hupe auf Dauerton schalten.

Flammenüberwachungsanlagen kontrollieren die Funktion von Öl-, Gas- oder Kohlenstaubbrennern in Heizanlagen, Dampferzeugern usw., geben bei Flammenausfall Alarm und sperren die Brennstoffzufuhr. Die Messung erfolgt fotoelektrisch oder über Flammenelektroden, die die Leitfähigkeit der heißen Flammengase messen.

Wassereinbrüche werden mit Fühlelektroden nachgewiesen, zwischen denen bei Vorhandensein von Wasser Strom fließt, der das Signal auslöst.

Patientenüberwachungsanlagen kontrollieren in Intensivtherapie-Stationen großer Krankenhäuser Pulsschlag, Blutdruck, Atemfrequenz u. a. von gefährdeten Patienten und geben bei lebensbedrohlichen Abweichungen von den Normwerten Alarm.

11.5. Elektronische Bauelemente

Elektronische Bauelemente rufen entweder einen elektrischen Energie- oder Informationsfluß hervor oder verstärken ihn, oder es wird mit ihnen ein Energie- bzw. Informationsfluß gesteuert, gewandelt oder gespeichert, wobei entweder der Energie- oder der Informationsfluß oder beide elektrischer Natur sind. Unterschieden werden passive und aktive Bauelemente. Bauelemente für Informations- und Leistungselektronik sowie für Analog- und Digitalbetrieb. In der technischen Ausführung gibt es singuläre (diskrete), hybridintegrierte und monolithische Bauelemente.

11.5.1. Passive Bauelemente

Widerstände sind Bauelemente, durch die bei angelegter Spannung ein Strom fließt, dessen

Betrag vom Widerstandswert abhängt. Ein solcher Widerstand ist in seinem Verhalten durch Widerstandswert, zulässige Leistungsaufnahme, zulässige Betriebsspannung, Temperaturabhängigkeit, Frequenzverhalten, Rauschen und konstruktiv durch die Bauform gekennzeichnet.

Lineare Widerstände. Ein elektrischer Widerstand, bei dem Spannung und Strom streng proportional zueinander sind, wird als *linearer Widerstand* bezeichnet. Es gibt feste und einstellbare lineare Widerstände. Nach der Art des Widerstandsmaterials werden Draht-, Schicht- und Massewiderstände unterschieden.

Drahtwiderstände bestehen meist aus einem keramischen Rohr mit einer einlagigen Drahtwicklung. Die einzelnen Windungen sind durch eine Oxidschicht auf dem Draht oder eine Lackschicht gegeneinander isoliert. Als Material wird Konstantan- oder Chromnickeldraht verwendet. Drahtwiderstände werden vor allem für größere Leistungen eingesetzt.

Schichtwiderstände sind keramische, zylindrische Körper, auf die eine Widerstandsschicht aus Glanz-, Borkohle oder Metall aufgebracht ist. Es gibt Ausführungen mit radialen und axialen Anschlußdrahten, die meist über Anschlußkappen mit der Schicht verbunden sind.

Massewiderstände bestehen aus in Zylinderform gepreßtem Pulvergemisch aus leitendem und nichtleitendem Material. Die Kontaktierung erfolgt durch axiale Drahtanschlüsse.

Drehwiderstände enthalten einen als nichtgeschlossenen Ring ausgeführten Draht- oder Schichtwiderstand, auf dem ein beweglicher Kontaktarm gleitet.

Schiebewiderstände und *Flachbahnregler* unterscheiden sich vom Drehwiderstand darin, daß der bewegliche Kontaktarm längs einer geraden Widerstandsbahn gleitet.

Nichtlineare Widerstände. Ein elektrischer Widerstand, bei dem Spannung und Strom infolge des Leitungsmechanismus oder der besonderen Wirkung der Wärme durch den Strom nicht proportional zueinander sind, heißt *nichtlinearer Widerstand*. Es ist dabei zwischen Varistoren und Thermistoren zu unterscheiden.

Varistoren (von engl. *vari*able resis*tor*) sind Widerstände, deren Widerstandswert von der angelegten Spannung bzw. vom durchfließenden Strom abhängt. Sie werden in Entzerrerschaltungen zur Linearisierung von Aussteuerungskennlinien eingesetzt.

Thermistoren (von engl. *therm*ally sensitive re*sistor*) sind temperaturabhängige oxidische Halbleiterwiderstände. Ist der Temperaturkoeffizient positiv, werden sie als TP-Typen bezeichnet, ist er negativ, als TN-Typen; letztere nennt man auch *Heißleiter*. Thermistoren werden benutzt zur Temperaturmessung, Leistungsmessung bei hohen Frequenzen, Zeitverzögerung von Schaltvorgängen u. a.

Fotowiderstände bestehen aus Halbleiterwerkstoffen, z. B. einer dünnen Schicht Zäsiumsulfid, -selenid, Indiumantimonid oder Bleisulfid auf einem Substrat. Die halbleitende Schicht hat einen vom auftreffenden Licht abhängigen Widerstand. Sie werden vor allem im Infrarotbereich verwendet, jetzt meist durch Halbleiterfotodioden (vgl. 11.5.3.) ersetzt.

Kondensatoren bestehen aus 2 durch ein Dielektrikum voneinander getrennten, elektrisch leitenden Elektroden. Kondensatoren sind durch Kapazität, Dielektrizitätskonstante, Verlustwinkel, Betriebsspannung, Temperaturabhängigkeit sowie durch ihre Bauform gekennzeichnet.

Papierkondensatoren haben als Dielektrikum ein imprägniertes Papier und als Elektroden beiderseitig aufgelegte Aluminiumfolie. Meist wird ein Wickel gebildet, mit dem sich Kapazitäten bis zu einigen Mikrofarad erreichen lassen.

Metall-Papier-(MP-)Kondensatoren besitzen als Dielektrikum ein lackiertes, imprägniertes Papier, auf das die Elektroden als dünne Metallschicht von $\approx 1\ \mu m$ Dicke aufgedampft sind. Aufgrund der geringen Dicke des Metallbelags findet bei einem Spannungsdurchschlag eine Selbstheilung statt.

Kunstfoliekondensatoren sind wie Papier- und MP-Kondensatoren aufgebaut. Als Dielektrikum werden Folien aus Polystyrol verwendet. Kunstfoliekondensatoren zeichnen sich durch hohe zeitliche Konstanz und geringe Verluste aus. Sie werden daher u. a. in Filtern und Netzwerken der Nachrichtentechnik verwendet.

Lackfilmkondensatoren bestehen aus einem 1 bis 3 μm dicken Lackfilm, auf den die Elektroden als Metallschicht aufgedampft sind. Wegen ihres geringen Volumens werden sie vor allem in tragbaren Nachrichtengeräten eingesetzt.

Glimmerkondensatoren sind aus Glimmerblättchen mit aufgebrannten Metallbelägen zusammengesetzt; sie haben keine praktische Bedeu-

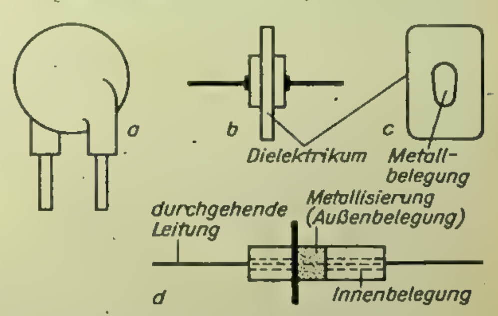


Abb. 11.5.1-1 *Bauformen von Keramikkondensatoren: a Scheibenkondensator mit Stiften für gedruckte Schaltungen und b mit axialen Lötanschlüssen, c Einsteckkondensator für gedruckte Schaltungen, d Durchführungskondensator*

tung mehr, weil andere Kondensatortypen zweckmäßiger sind.
Keramikkondensatoren besitzen als Dielektrikum einen keramischen Werkstoff, auf den die Elektroden durch Aufbrennen einer Silberschicht erzeugt werden. Dadurch entsteht ein gegen mechanische und klimatische Beanspruchungen beständiges Bauelement. Man unterscheidet NDK-Typen (*n*iedrige *D*ielektrizitäts*k*onstante) und HDK-Typen (*h*ohe *D*ielektrizitäts*k*onstante). Wegen ihres definierten Temperaturverhaltens können sie auch zur Kompensation des Temperaturgangs anderer frequenzbestimmender Bauelemente verwendet werden. Die Bauformen von Keramikkondensatoren sind entsprechend dem Anwendungsbereich unterschiedlich (Abb. 11.5.1-1).
Elektrolytkondensatoren beruhen in ihrem Wirkungsprinzip auf der Bildung einer Oxidhaut auf dem sog. Ventilmetall, das meist aus Aluminium oder Tantal besteht und die Anode darstellt (Abb. 11.5.1-2). Die Oxidhaut besitzt einen hohen spezifischen Widerstand und dient als Dielektrikum. Die Gegenelektrode ist bei den Aluminium-Elektrolytkondensatoren eine mit einer Elektrolytflüssigkeit getränkte Papierfolie; der Anschluß erfolgt über eine Metallfolie, die Katode. Bei Elektrolytkondensatoren auf der Basis von Tantal ist die Gegenelektrode aus Mangandioxid. Elektrolytkondensatoren finden vor allem in Stromversorgungsgeräten Verwendung.
Veränderliche Kondensatoren lassen sich in Trimmer und Drehkondensatoren einteilen.
Trimmer setzt man bevorzugt dort ein, wo der Kapazitätswert nur selten, z. B. zum Abgleich, eingestellt werden muß. Nach der Bauform sind zu unterscheiden Scheiben-, Rohr-, Quetsch- und Mehrplattentrimmer.

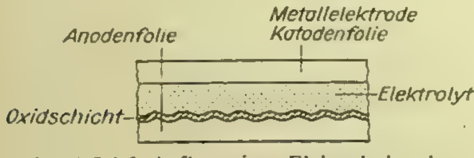


Abb. 11.5.1-2 *Aufbau eines Elektrolytkondensators*

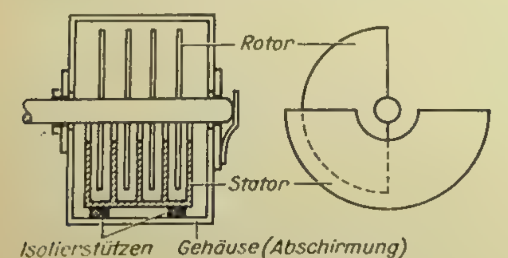


Abb. 11.5.1-3 *Drehkondensator*

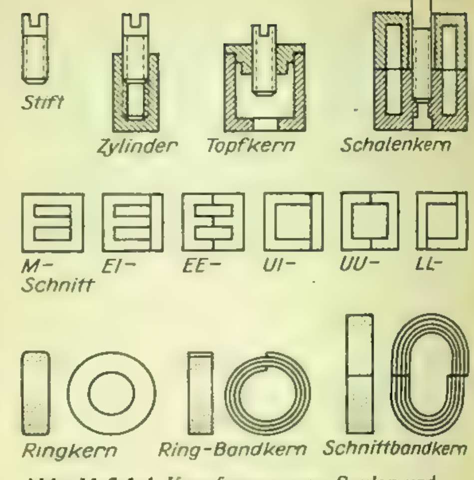


Abb. 11.5.1-4 *Kernformen von Spulen und Übertragern*

Drehkondensatoren finden Verwendung bei häufigen Veränderungen der Kapazität, z. B. zur Frequenzeinstellung von Funksende- und -empfangsgeräten. Sie bestehen aus 2 Plattenpaaren, und zwar dem feststehenden Stator und dem drehbaren Rotor (Abb. 11.5.1-3). Im allgemeinen wird als Dielektrikum Luft dem für geringere Anforderungen ausreichendem Hartpapier vorgezogen.
Spulen. Bei Spulen ist zwischen Luftspulen und Spulen mit hochpermeablem Kern zu unterscheiden. Spulen sind durch Induktivität, Verlustwinkel oder Verlustfaktor bzw. Güte gekennzeichnet.
Luftspulen sind entweder freitragend oder auf einem nichtmagnetisierbaren Isolierstoffkörper gewickelt, wobei die Wicklung auf den Isolierstoffkörper auch aufgedampft oder aufgebrannt werden kann. Luftspulen werden fast nur noch im Senderbau verwendet.
Spulen mit hochpermeablem Kern sind meist auf einen Spulenkörper aus Isolierstoff gewickelt, der teilweise oder vollständig vom Kern ausgefüllt wird. Nach der Kernform wird unterschieden zwischen nichtgeschlossenem und geschlossenem Kern. Nichtgeschlossene Kerne sind Stift- und Zylinderkerne sowie der Haspelkern. Geschlossene Kerne sind Ring-, Schalen- und Topfkerne sowie die sog. Schnittkerne, wie M-, EI-, EE-, UI-, UU- und LL-Kerne (Abb. 11.5.1-4). Als Kernwerkstoff dienen weichmagnetische Pulvereisenmassen, Ferrite sowie Bleche und Bänder aus legiertem Eisen; Legierungsbestandteile sind Silizium, Nickel, Chrom und Aluminium.
Übertrager werden verwendet zur Übersetzung von Spannungen und Strömen, Anpassung von Widerständen, galvanischen Trennung von Stromkreisen und Phasenumkehr. Übertrager

zur Übersetzung (Transformation) von Spannungen in Stromversorgungseinrichtungen bezeichnet man allgemein als Netztransformatoren (vgl. 11.2.2.). Die wichtigsten Kenngrößen von Übertragern sind Übersetzungsverhältnis, Wicklungs- und Streuinduktivität, Ohmscher Widerstand, Wicklungskapazität, Hysteresis-, Wirbelstrom- und sonstige Kernverluste. Die technische Ausführung von Übertragern erfolgt in gleicher Weise wie die von Spulen. Übertrager ohne Kern werden lediglich im Senderbau eingesetzt. Sonst werden Übertrager mit offenem oder geschlossenem Kern verwendet. Im Niederfrequenzbereich, vor allem bei Stromversorgungsgeräten, werden geschlossene Kerne benutzt. Wo besonders geringe Streuungen gefordert werden, z. B. in Fernsehempfängern, findet der *Schnittbandkern* Anwendung, ein aus Blechband gewickelter Ringkern, der zum Einsetzen des Wickelkörpers aufgeschnitten und danach wieder zusammengeklebt wird. Ringkerne aus Eisenpulver oder Ferriten werden bis zu Frequenzen von einigen 100 MHz eingesetzt.

Piezoelektrische Bauelemente. Verschiedene Kristalle, insbesondere Quarzkristall, erzeugen bei einer mechanischen Deformation elektrische Ladungen, sog. Piezoeffekt. Auch der reziproke Effekt, die Elektrostriktion, ist vorhanden. Im allgemeinen treten beide Effekte immer gleichzeitig auf. Je nach Form und Abmessungen der Kristallplatten können Stab- und Dickendehnungsschwingungen, Flächen- und Dickenscherungsschwingungen sowie Biegungsschwingungen auftreten. Die Eigenfrequenz hängt von den Abmessungen und Materialkonstanten ab. In der Nähe der Eigenfrequenz besitzt der Quarzkristall ein Frequenzverhalten, das sich durch ein Ersatzschaltbild mit einem Serien- und einem Parallelresonanzkreis beschreiben läßt. Der Frequenzbereich reicht von einigen 100 Hz bis ≈ 50 MHz, bei der Anregung von Oberwellen bis ≈ 300 MHz. Der Verlustfaktor liegt bei $\approx 10^{-5}$ und darunter, daher werden Quarzkristalle als Resonatoren in Filtern mit hoher Selektion, sog. *Quarzfilter*, sowie zur Stabilisierung selbsterregter Oszillatoren, sog. *Quarzoszillatoren*, eingesetzt.

Ringkernspeicherelement. Ein ferromagnetischer Ringkern mit rechteckiger Magnetisierungsschleife, der 3 oder mehr Wicklungen trägt, stellt ein Element eines magnetischen Speichers dar. Jede Wicklung besteht i. allg. nur aus einer Windung in Form eines durchgesteckten Drahtes. Draht 1 und 2 heißen Zeilen- oder Spaltenauswahldraht, Draht 3 ist der Lesedraht. Bei Ringkernen geht die darin gespeicherte Information beim Abfragen verloren. Durch automatisches neues Einschreiben wird der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt; dazu sind spezielle Schaltanordnungen erforderlich.

Wellenleiter dienen der Fortführung elektromagnetischer Wellen. Bei ihnen werden Leitungsströme teilweise oder völlig durch Verschiebungsströme ersetzt. Die Arten der Wellenleiter werden nach Bauweise und Werkstoff unterschieden (Abb. 11.5.1-5).

Doppelleitungen gibt es als symmetrische, bei der die Energieübertragung vorwiegend zwischen den beiden Leitern, und unsymmetrische Doppelleitung, bei der sie zwischen Innenleiter und Innenwand des Außenleiters erfolgt. Das im UKW- und Fernsehempfangsanlagen häufig benutzte *Bandkabel* ist eine besonders kostengünstige Ausführung einer symmetrischen Doppelleitung. Eine biegsame unsymmetrische Doppelleitung ist das *Koaxialkabel*. Der Innenleiter ist dabei durch Isolierscheiben, -wendel oder durch Schaumstoff abgestützt. Der Außenleiter besteht aus einem Metallgeflecht oder -band, über das eine Kunststoffhülle gezogen ist. Koaxialkabel werden im Frequenzbereich von einigen Megahertz (Videosignalbereich) bis zu einigen Gigahertz, in speziellen Fällen sogar bis zu ≈ 18 GHz (Mikrowellenbereich), eingesetzt.

Hohlleiter. Der metallische Hohlleiter ist ein Wellenleiter, der durch ein Rohr mit leitenden Wänden nach außen vollständig begrenzt ist. Die Fortleitung der elektromagnetischen Welle erfolgt im Inneren des Rohres. Die angeregten elektrischen und magnetischen Felder der Welle breiten sich in axialer Richtung nach beiden Seiten des Rohres aus. Die Konfiguration der Felder im Hohlleiter hängt von der auftretenden Schwingungsform ab. Bei metallischen Hohlleitern ist zwischen *Rechteck-* und *Rundhohlleitern* zu unterscheiden. Hohlleiter werden besonders im Frequenzbereich oberhalb 1 GHz wegen der gegenüber Koaxialkabeln geringen Dämpfung eingesetzt. Rundhohlleiter zeichnen sich bei bestimmten Schwingungsformen durch besonders geringe Ausbreitungsdämpfungen aus.

Streifenleitungen. Die Streifenleitung ist ein Wellenleiter, dessen Wirkungsprinzip dem des Koaxialkabels ähnlich ist. Dem Innenleiter des

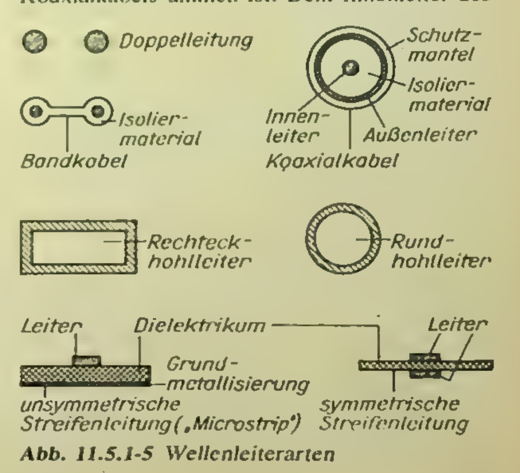


Abb. 11.5.1-5 *Wellenleiterarten*

Koaxialkabels entspricht der auf dem Substrat liegende Leitungszug, dem Außenleiter die Grundmetallisierung des Substrats; diese Ausführung wird auch als *Microstrip* bezeichnet. Sie wird im Frequenzbereich oberhalb ≈ 300 MHz bis zu einigen Gigahertz angewendet. Die Leitungszüge werden mit Masken aufgedampft oder aus dem beschichteten Substrat herausgeätzt. Die Herstellung erfolgt i. allg. in Dünnschichttechnik, seltener in Dickschichttechnik.

Höchstfrequenz-Bauelemente. Im Höchstfrequenzbereich, das ist der Frequenzbereich zwischen ≈ 1 GHz und 300 GHz (Wellenlänge 30 cm bis 1 mm), auch Mikrowellenbereich genannt, liegen die Abmessungen der Bauelemente in der Größenordnung der Wellenlänge. Sie stellen daher keine konzentriert wirkenden Bauelemente mehr dar, vielmehr besitzen Spannungen und Ströme eine Verteilung längs der Ausdehnung des betreffenden Bauelements.

Leitungsbauelemente dienen zur Verbindung von Baugruppen. Dazu gehören Koaxialkabel und koaxiale Steckverbindungen, die bei ausreichend kleinem Durchmesser bis zu ≈ 18 GHz eingesetzt werden können. Wegen der bei Koaxialkabeln mit der Frequenz zunehmenden Dämpfung werden zur Erzielung geringer Dämpfungen sowie zur Übertragung größerer Leistungen und bei hohen Spannungen metallische Hohlleiter und Hohlleiterbauelemente benutzt. Dazu gehören *starre* und *flexible Hohlleiter*, *Winkelstücke*, *Polarisationsdreher*, *Verzweigungen* u. a. Reelle Widerstände werden als *Abschlußwiderstände* und *Dämpfungsglieder* eingesetzt.

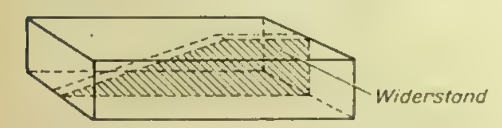


Abb. 11.5.1-6 Hohlleiterabschlußwiderstand

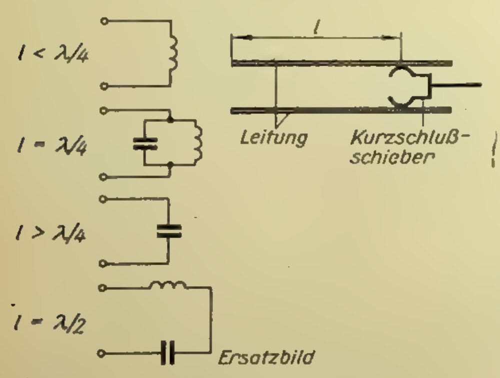


Abb. 11.5.1-7 Einseitig kurzgeschlossene Leitung

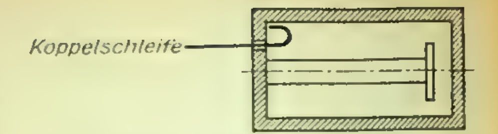


Abb. 11.5.1-8 Topfkreisresonator

Zur Erzielung eines reflexionsfreien Abschlusses muß der Widerstand die Länge von einer Wellenlänge oder mehr und eine Anspitzung (Abb. 11.5.1-6) besitzen. Zur Herstellung von Reaktanzen dient für Frequenzen von einigen Gigahertz die kurzgeschlossene Koaxialleitung (Abb. 11.5.1-7). Durch Verstellen des Kurzschlußschiebers lassen sich mit $l < \lambda/4$ Induktivitäten, mit $l > \lambda/4$ Kapazitäten und mit $l = \lambda/4$ (Parallelresonanz) sowie mit $l = \lambda/2$ (Serienresonanz) Resonatoren realisieren. In der Hohlleitertechnik sind Reaktanzen durch metallische Blenden realisierbar bzw. durch dielektrische oder leitende Stifte, die in den Hohlleiter eintauchen.

Höchstfrequenzresonatoren sind durch leitende Wände abgeschlossene Bauelemente, in denen bei der Resonanzfrequenz bei Zufuhr einer geringen Wirkleistung relativ große elektrische und magnetische Feldstärken auftreten. *Leitungsresonatoren* sind kurzgeschlossene Koaxialleitungen mit einer Länge von $\lambda/4$ und ungradzahlig Vielfachem davon oder beiderseits kurzgeschlossenen Koaxialleitungen der Länge $\lambda/2$ bzw. λ.

Topfkreisresonatoren sind Leitungsresonatoren mit einer Länge $< \lambda/4$ und einem Innenleiter mit einer Stirnseitenkapazität, die durch eine Metallplatte gebildet wird (Abb. 11.5.1-8).

Hohlleiterresonatoren bestehen aus einem kurzen Stück eines Rechteck- oder Rundhohlleiters, der an beiden Seiten mit leitenden Ebenen abgeschlossen ist. Zur Ein- und Auskopplung der Energie dienen induktive Schleifen, Koppelstifte, Blenden und Schlitze.

11.5.2. Elektronenröhren

Elektronenröhren bestehen aus einem hochevakuierten Gefäß aus Glas, Keramik, Metall oder einer Kombination dieser Werkstoffe, in dem zwischen 2 Elektroden ein Elektronenstrom fließt. Die elektronenemittierende Elektrode heißt *Katode*, die elektronenaufnehmende *Anode*.

Dichtegesteuerte Elektronenröhren. Von der Katode werden durch thermische Emission Elektronen geliefert, die entsprechend der Polarität und der Größe des vor der Katode herrschenden Potentials entweder abgesaugt oder zurückgehalten werden. In diesem sog. Steuerraum ändert sich die Dichte der Elektronen im Takt des Potentials (*Dichtesteuerung*). Das Potential wird durch die Spannungen an den anderen Elektro-

den, meist den Steuerspannungen an gitterförmigen Elektroden (*Gitter*) zwischen Katode und Anode, bestimmt. Dichtesteuerung findet statt, solange die Zeit der Steuerspannungsänderung in der Größenordnung der Elektronenlaufzeit liegt. Sie erfolgt nahezu trägheitslos.
Die einfachste Elektronenröhre ist die *Diode*, die nur Katode und Anode enthält; sie wurde früher allgemein als Gleichrichterelement benutzt. Die *Triode* enthält ein Steuergitter, mit dem sich der Anodenstrom im Takte der Gitterspannung steuern läßt. Die *Tetrode* enthält noch ein 2. Gitter, das *Schirmgitter*, die *Pentode* zusätzlich ein 3. Gitter, das *Bremsgitter*; *Heptoden* enthalten 2 Steuer-, 2 Schirm- und 1 Bremsgitter. Von den dichtegesteuerten Elektronenröhren finden nur noch Trioden und Tetroden mit sehr großer Leistung im Senderbau Verwendung, z. B. Trioden für Lang- und Mittelwellensender mit Leistungen bis zu 2 MW, Tetroden in koaxialer Bauweise (Abb. 11.5.2-1) für UKW- und Fernsehsender bis 800 MHz mit 20 kW.
Laufzeitröhren. Mit ihnen werden hochfrequente Schwingungen unter Ausnutzung der Laufzeit der Elektronen erzeugt bzw. verstärkt. Es ist zwischen Trift- und Lauffeldröhren zu unterscheiden.
Triftröhren besitzen einen oder mehrere, durch hochfrequenzfreie Trifträume getrennte Resonatoren. Die Resonatoren können Bestandteile der Röhre sein, aber auch außen an der Röhre angebracht werden. Das *Mehrkammerklystron* (Abb. 11.5.2-2) liefert z. B. bei Frequenzen von 400 bis 800 MHz Dauerstrichleistungen bis 50 kW und Impulsleistungen von 50 MW; es wird angewendet z. B. in Fernsehsendern, Scatter-Richtfunksendern, Radarsendern sowie Linearbeschleunigern. Das *Reflexklystron* erzeugt infolge seiner inneren Rückkopplung selbsterregte Schwingungen im Frequenzbereich von 0,5 bis 50 GHz mit Leistungen bis zu 10 W im unteren Frequenzbereich.
Lauffeldröhren sind gekennzeichnet durch die Wechselwirkung des Elektronenstroms mit einer elektromagnetischen Welle, deren Phasengeschwindigkeit durch eine Verzögerungsleitung herabgesetzt wird. Die *Wanderfeldröhre* (Abb. 11.5.2-3) enthält eine Wendelleitung als Verzögerungsleitung. Die vom Strahlerzeu-

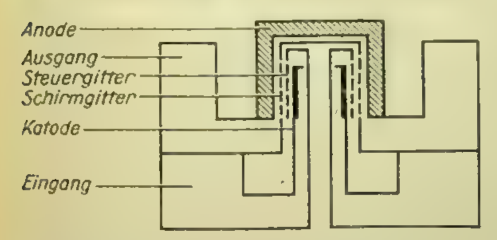


***Abb. 11.5.2-1** Querschnitt des koaxialen Elektrodenaufbaus einer Sendetetrode für den Frequenzbereich von 100 MHz und einer Leistung von 10 kW*

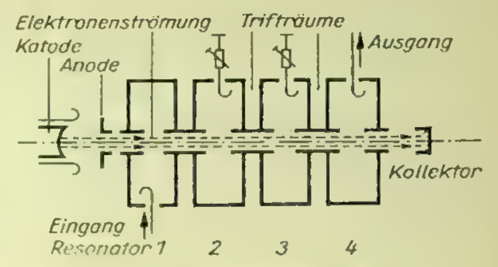


***Abb. 11.5.2-2** Aufbau eines Mehrkammerklystrons*

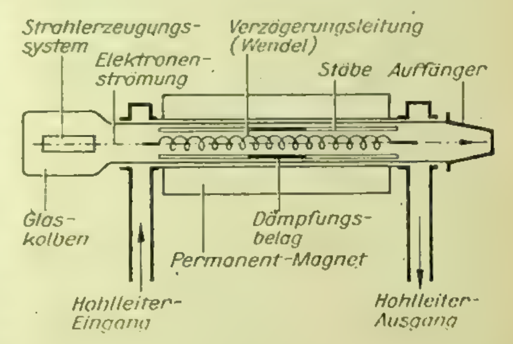


***Abb. 11.5.2-3** Aufbau einer Wanderfeldröhre*

gungssystem ausgehende Elektronenströmung wird durch ein Magnetfeld zum Auffänger geführt. Wanderfeldröhren werden im Frequenzbereich von 2 bis 50 GHz angewendet, unterhalb 10 GHz mit Leistungen bis zu 10 kW. In der *Rückwärtswellenröhre*, auch *Carcinotron* genannt, besteht eine Wechselwirkung der Elektronenströmung mit einer Rückwärtswelle. Diese Röhre wird als Oszillator verwendet. Da sich durch die Beschleunigungsspannung die Frequenz in weitem Bereich verändern läßt, wird sie vor allem zum Frequenzwobbeln (Frequenzmodulation) eingesetzt. Das *Magnetron* besitzt eine Verzögerungsleitung, die ringförmig als Anode um die zentrale Katode angeordnet ist, und hat senkrecht zum radialen elektrischen Feld ein axiales Magnetfeld. Das Magnetron erzeugt selbsterregte Schwingungen im Frequenzbereich von 0,4 bis 100 GHz und hohe Leistungen im Impuls- und im Dauerstrichbetrieb, z. B. bei 3 GHz ≈ 5 MW bzw. 50 kW. Das ***Impuls-Magnetron*** wird in erster Linie in Radargeräten angewendet, das ***Dauerstrich-Magnetron*** in Anlagen zur HF-Erwärmung, z. B. in HF-Küchen.
Elektronenstrahlröhren. In ihnen erfolgen Umwandlungen zwischen elektrischen Signalen und optischen Abbildungen mit Hilfe elektronenoptisch beeinflußter Elektronenstrahlen.

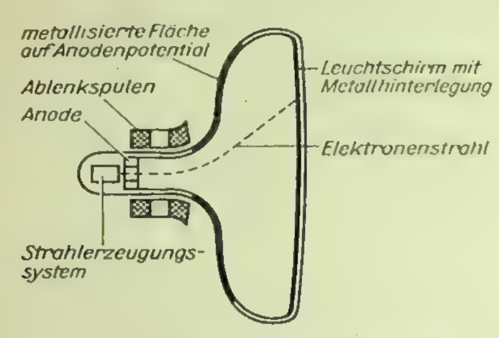


Abb. 11.5.2-4 *Schwarzweißfernsehbildröhre*

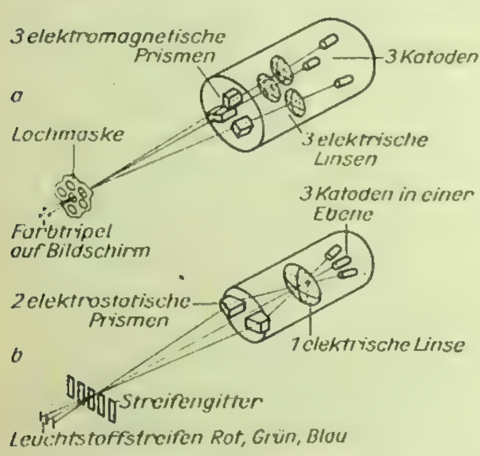


Abb. 11.5.2-5 *Farbfernsehbildröhre:* **a** *Lochmaskenröhre,* **b** *In-line-Röhre*

Die *Oszillografenröhre*, nach ihrem Erfinder *Braunsche Röhre*, gelegentlich auch *Katodenstrahlröhre* genannt, besitzt ein Strahlerzeugungssystem, 2 um 90° versetzte Ablenkplattenpaare und einen Leuchtschirm. Die vom abgelenkten Elektronenstrahl erzeugte Leuchtspur auf dem Leuchtschirm entspricht in Richtung und Betrag den Ablenkspannungen. Die *Fernsehbildröhre* für Schwarzweißfernsehen ist der Oszillografenröhre ähnlich, jedoch erfolgt die Elektronenstrahlablenkung mangetisch über 2 um 90° versetzte Ablenkspulenpaare, die als komplette Ablenkeinheit auf den Röhrenhals aufgeschoben wird (Abb. 11.5.2-4). Die *Radarbildröhre* unterscheidet sich von der Fernsehbildröhre dadurch, daß sie eine lange Nachleuchtdauer besitzt. Die Fernsehbildröhre für Farbfernsehen arbeitet mit je einem Elektronenstrahl für die Grundfarben Rot, Grün und Blau. Bei der *Lochmaskenröhre* sind die 3 Strahlerzeugungssysteme gegenseitig um 120° versetzt und so ausgerichtet, daß sich die 3 Elektronenstrahlen vor Erreichen des Leuchtschirms schneiden und durch die Lochmaske treten (Abb. 11.5.2-5a). Auf dem Leuchtschirm sind die Leuchtstoffe Rot, Grün und Blau in zyklischer Folge als aneinander stoßende Punkte aufgebracht, wobei jedem Loch der Maske ein Farbtripel entspricht. Bei den moderneren Röhren liegen die Katoden in einer Reihe („In-line-Röhre"), und die 3 Strahlen laufen durch den Mittelpunkt des elektronenoptischen Systems (Abb. 11.5.2-5b). Anstelle der Lochmaske wird bei dieser Röhre eine Streifenmaske benutzt. Außerdem ist der Leuchtstoff auf den Leuchtschirm in Form von schmalen Streifen aufgebracht. Die *Bildwandlerröhre* dient der elektronenoptischen Abbildung eines von einem optischen Bild auf einer Fotokatode hervorgerufenen Emissionsbilds auf einem Leuchtschirm; Anwendung z. B. in Nachtsichtgeräten, mit Umwandlung der IR-Strahlung in sichtbares Licht. Bildwandlerröhren mit starkem Beschleunigungsfeld besitzen eine hohe Verstärkung (*Bildverstärkerröhre*), z. B. Röntgenbildverstärker.
Bildaufnahmeröhren werden in Fernsehaufnahmekameras verwendet (vgl. 11.4.5.).

11.5.3. Halbleiterbauelemente

Die Funktion von Halbleiterbauelementen beruht auf dem Verhalten von Ladungsträgern in Halbleiterkristallen und in Strukturen, die aus verschiedenen Halbleiterkristallen sowie aus Metallen und Isolatoren bestehen können.
Halbleiterdioden. Als wichtigstes Funktionselement in den meisten Halbleiterbauelementen tritt der *pn*-Übergang auf (vgl. 11.1.1.). Ein solcher *pn*-Übergang hat Gleichrichterwirkung; seine technische Ausführung wird als *Halbleiterdiode* bezeichnet. Als Halbleitermaterialien werden vorwiegend Germanium und Silizium benutzt. Die wichtigsten statischen Kennwerte

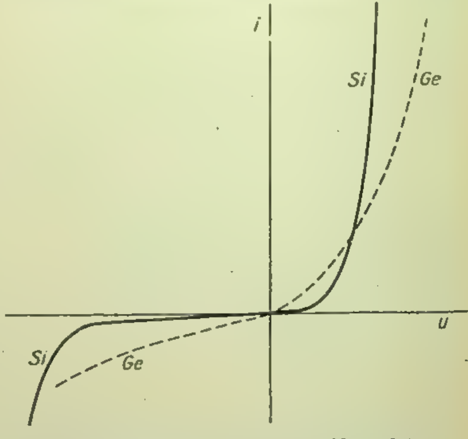


Abb. 11.5.3-1 *Strom-Spannungs-Kennlinie einer Germanium-(Ge)- und einer Silizium-(Si)-Halbleiterdiode*

einer Diode sind *Durchlaßspannung* für bestimmte Werte des Durchlaßstroms und *Sperrstrom* bei bestimmten Werten der Sperrspannung. Fluß- und Sperreigenschaften des *pn*-Übergangs kennzeichnen die Richtwirkung, die durch die *Strom-Spannungs-Kennlinie* veranschaulicht wird (Abb. 11.5.3-1).

Spitzendioden bestehen meist aus *n*-leitendem Germanium (Katode), auf das eine Metallspitze (Anode) aufgesetzt ist. Sie werden mit Glas- oder Kunststoffgehäuse vorzugsweise in der Informationselektronik eingesetzt.

Flächendioden haben meist ein *n*-leitendes Siliziumplättchen als Substrat, das die Katode bildet, und eine in das Substrat eindiffundierte Anode. Flächendioden werden in der Informations- und auch Leistungselektronik benutzt. **Planardioden** sind diffundierte Flächendioden entweder mit oder ohne Epitaxieschicht (aufgewachsene einkristalline Schicht auf Einkristallsubstrat). Die Vorteile liegen in dem einfacheren Fertigungsverfahren und der hohen Zuverlässigkeit. *Tunneldioden* sind legierte Flächendioden. Im Halbleitermaterial, das eine extrem hohe Störstellenkonzentration hat, bildet sich eine dünne *pn*-Sperrschicht aus. Die Strom-Spannungs-Kennlinie besitzt einen Abschnitt mit fallender Tendenz, in dem der Widerstand negativ ist. Tunneldioden eignen sich daher zum Aufbau von Schwingschaltungen und Reflexionsverstärkern, und zwar bis zu Frequenzen von ≈ 25 GHz, sowie als schnelle Schalter. *Z-Dioden* sind Siliziumdioden, die im Gebiet der Durchbruchspannung arbeiten. Sie werden zur Spannungsstabilisierung, als Bezugsspannungsquelle und zur Begrenzung eingesetzt. *Varaktordioden* sind Siliziumdioden, deren Sperrschicht als Dielektrikum eines Kondensators dient, dessen Elektroden von der *p*- und der *n*-leitenden Zone gebildet werden; daher auch die Bezeichnung *Kapazitätsdiode*. Die Spannungsabhängigkeit der Sperrschichtkapazität wird zur elektronischen Abstimmung, Frequenzvervielfachung und parametrischen Verstärkung ausgenutzt, insbesondere bei Frequenzen oberhalb 1 GHz. Die *PIN-Diode* ist eine Siliziumdiode, bei der der *pn*-Übergang durch eine Eigenleitung, die *Intrinsicschicht*, getrennt ist, wodurch sie u. a. eine hohe Spannungsfestigkeit erhält. In *Lawinenlaufzeit-(Impatt-)dioden* entstehen durch Ladungsträgervervielfachung infolge Stoßionisation und durch Laufzeitmechanismen Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung, so daß unter bestimmten Bedingungen ein negativer Widerstand auftritt, der zur Schwingungserzeugung, insbesondere bei Frequenzen oberhalb einiger Gigahertz, ausgenutzt wird.

Fotodioden beruhen auf der Erscheinung, daß an einem *pn*-Übergang durch Lichteinstrahlung zusätzliche Ladungsträger erzeugt werden und dieser Effekt das Auftreten einer EMK, der *Fotospannung*, bewirkt. Als *Solarzellen* (Fotoelemente) werden sie zur Erzeugung von elektrischer Energie aus Sonnenlicht eingesetzt. *Lumineszenzdioden* haben einen in Durchlaßrichtung betriebenen *pn*-Übergang. Bei Anlegen einer Spannung tritt eine Strahlung auf, die je nach Material im sichtbaren Lichtbereich oder im IR-Bereich liegt. Erstere, oft auch *Leuchtdioden* genannt, werden z. B. einzeln oder in Gruppen in Anzeigeeinrichtungen angewendet. Fotozelle und Fotoelement vgl. 13.2.11. *Laserdioden* wandeln elektrische Energie unmittelbar in kohärente Strahlung im sichtbaren oder IR-Bereich um. Sie sind den Leuchtdioden sehr ähnlich und dienen z. B. als Sender bei der Nachrichtenübertragung durch Glasfasern (vgl. 11.4.). Fotodioden, Solarzellen, Leuchtdioden, Laserdioden u. a. werden als *optoelektronische Bauelemente* (vgl. 11.5.5.) bezeichnet.

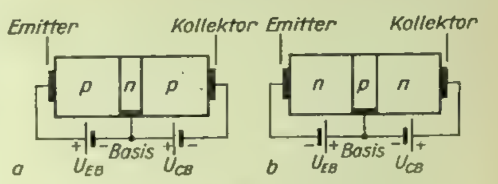


Abb. 11.5.3-2 Zonenfolge bei Bipolartransistoren: a pnp-Transistor, b npn-Transistor

Transistoren sind Halbleiterbauelemente mit 3 Elektroden. Sie dienen zur Verstärkung und Schwingungserzeugung sowie für Regel- und Schaltzwecke. Die verarbeitbaren Leistungen liegen zwischen Milliwatt und einigen 100 W, die Frequenzen zwischen Null und einigen Gigahertz. Es ist zwischen Bipolar- und Unipolartransistoren zu unterscheiden. Bei Bipolartransistoren wird die Funktionsweise hauptsächlich durch beide Ladungsträgerarten (Elektronen und Fehlstellen) bestimmt, bei den Unipolartransistoren erfolgt der Ladungstransport nur mit Hilfe e i n e r Ladungsträgerart.

Bipolartransistoren besitzen als Elektroden *Emitter*, *Basis* und *Kollektor*. Zwischen Emitter und Basis sowie zwischen Basis und Kollektor bestehen *pn*-Übergänge. Je nach der Anordnungsfolge gibt es *pnp*- und *npn*-Transistoren (Abb. 11.5.3-2). Das Verhalten des *npn*-Transistors entspricht bei entgegengesetzter Polung der Betriebsspannung dem des *pnp*-Transistors. Als Halbleitermaterial wird neben Germanium vor allem Silizium benutzt. Aus technologischen Gründen werden bevorzugt Germaniumtransistoren mit *pnp*- und Siliziumtransistoren mit *npn*-Folge gefertigt. Nach dem Herstellungsverfahren sind zu unterscheiden: Legierungs-, Diffusions-, diffusionslegierte, Mesa-, Planar- und Epitaxieplanartransistoren. Bei den *Legierungstransistoren* werden die Dotierungselemente (z. B. Aluminium oder Indium) in Form von

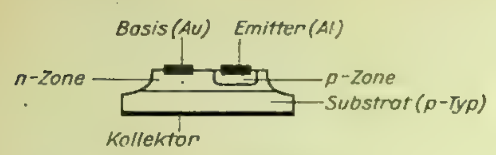


Abb. 11.5.3-3 *Mesatransistor*

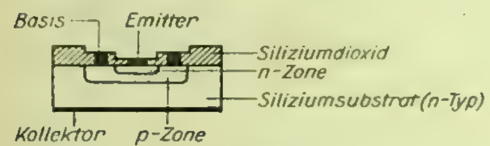


Abb. 11.5.3-4 *Planartransistor*

Perlen einlegiert. Germaniumtransistoren für den Niederfrequenzbereich und Schalterbetrieb werden auf diese Weise hergestellt. Der *Drifttransistor* hat eine durch Diffusion hergestellte nicht homogen dotierte Basisschicht, daher auch die Bezeichnung *Diffusionstransistor*. Er hat Grenzfrequenzen bis in den Gigahertzbereich. Der *Mesatransistor*, der seinen Namen nach seinem Aussehen („mesa", spanisch „Tafelberg") (Abb. 11.5.3-3) bekommen hat, wird in einer Kombination von Diffusions- und Legierungstechnik hergestellt. Er wird vor allem in Empfängervorverstärkern und Mischern im Hochfrequenzgebiet eingesetzt. Der *Planartransistor* (Abb. 11.5.3-4) besitzt durch eine Siliziumdioxidschicht, die auf die Transistoroberfläche aufgebracht ist, einen Schutz gegenüber äußeren Einflüssen. Nachteilig sind bei diesem Typ die hohen Restspannungen, die sich durch eine Epitaxieschicht stark reduzieren lassen. Das Verfahren führte zum *Epitaxieplanartransistor*. Es wird dabei von einer ≈ 200 μm dicken *n*-leitenden Siliziumplatte (Substrat) ausgegangen, mit der epitaktisch, d. h. unter Aufrechterhaltung der einkristallinen Orientierung, eine ≈ 10 μm dicke hochohmige Schicht verwachsen ist. Die Oberfläche des Substrats erhält dann eine ≈ 1 μm dicke Siliziumdioxidschicht. Mit Hilfe der *Fotomasken-* und *Ätztechnik* werden Fenster im Substrat freigelegt und anschließend eine Vielzahl von Basiselektroden in das Substrat eindiffundiert.

Nach erneuter Oxydation und einem weiteren Foto- und Ätzprozeß diffundiert man eine Vielzahl von Emitterelektroden ein. Nach einer nochmaligen Oxydation und einem letzten Foto- und Ätzprozeß werden Fenster für die einzudiffundierenden metallischen Anschlüsse der Basis- und Emitterelektroden freigelegt (Abb. 11.5.3-5).

Mikrowellentransistoren sind für den Einsatz im Frequenzbereich oberhalb 1 GHz bestimmt. Diese Transistoren müssen kleine aktive Flächen und schmale Zwischenräume zwischen Emitter und Basis besitzen. Da die Masken- und Diffusionstechnik hier Grenzen setzt, wird die *Ionenimplantation* angewendet, mit der Basisweiten bis herab zu 1 μm erzielbar sind. Mikrowellentransistoren für größere Leistungen werden in der sog. *Overlay-Technik* hergestellt. Bei ihr wird auf der Basisfläche eine große Anzahl kleiner Emittergebilde (Rechtecke oder Finger) aufgebaut, die gegenüber der Basis eine geringe Kapazität aufweisen. Anschließend wird ein isolierender Siliziumoxidüberzug hergestellt, in dem durch Maskenätztechnik bei jedem Partialemitter eine Öffnung erzeugt wird. Ein aufgedampfter mäanderförmiger Metallstreifen verbindet die Teilemitter leitend; daher rührt auch die Bezeichnung „overlay", d. h. „darübergelegt". Zur Vermeidung von unzulässig hohen Belastungen von Partialemittern wird meist zwischen jedem Emitter und der Emittersammelschiene je ein kleiner Widerstand aufgedampft. Damit erreicht man relativ hohe Leistungen von ≈ 20 W bei ≈ 3 GHz.

Fototransistoren stellen physikalisch eine Kombination von Fotodiode, die durch den zwischen Basis und Kollektor bestehenden *pn*-Übergang gebildet wird, und einem verstärkenden Transistor dar. Der Kollektorstrom ist proportional der Beleuchtung.

Unipolartransistoren. Bei ihnen erfolgt der Ladungstransport im Gegensatz zu den Bipolartransistoren mit Hilfe einer Ladungsträgerart, dem Majoritätsträger, durch einen Kanal. Dieses Wirkungsprinzip liegt dem *Feldeffekttransistor* (*FET*) zugrunde. Bei ihm wird die Intensität des Ladungstransports durch eine äußere Steuergröße beeinflußt, und zwar durch ein elektrisches Feld, den sog. Feldeffekt. Das Feld wird von einer Steuerelektrode, dem *Gate* oder *Tor*, erzeugt. Die Eintrittselektrode des Kanals heißt *Source* oder *Quelle*, die Austrittselektrode *Drain* oder *Senke*. Die Steuerung kann entweder durch Querschnittsveränderungen des stromführenden Kanals oder durch Leitfähigkeitsveränderungen erfolgen. Das Prinzip der Querschnittsveränderung wird realisiert durch Steuerung mit Hilfe

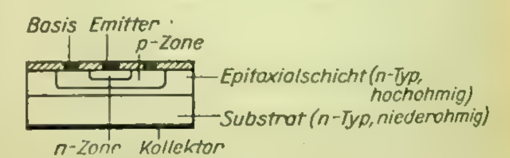


Abb. 11.5.3-5 *Epitaxieplanartransistor*

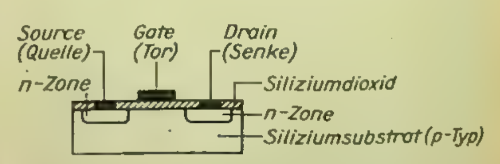


Abb. 11.5.3-6 *Feldeffekttransistor (MISFET bzw. MOSFET)*

eines *pn*-Übergangs, daher heißen die entsprechenden Transistoren Sperrschicht-FET. Statt eines *pn*-Übergangs kann ein Metall-Halbleiter-Übergang (*m*etal-*s*emiconductor; *MES*) benutzt werden; diese Transistoren nennt man *MESFET*. Bei dem Pinzip der Leitfähigkeitsveränderung wird durch eine isoliert über dem Kanal angebrachte Feldelektrode, die an Spannung liegt, das steuernde Feld erzeugt. Grundsätzlich liegt bei diesem Transistortyp eine Schichtfolge Metall (Steuerelektrode)-Isolator-Halbleiter vor. Daraus ist die Bezeichnung *MISFET* (*m*etal-*i*solator-*s*emiconductor) abgeleitet worden (Abb. 11.5.3-6). Bei dem überwiegend angewendeten Siliziumsubstrat wird die auf der Oberfläche gebildete Siliziumdioxidschicht als Isolator benutzt, damit entsteht die Strukturfolge Metall-Oxid-Halbleiter (*m*etal-*o*xide-*s*emiconductor; *MOS*) und die Bezeichnung *MOSFET*.
Der FET ist dem Bipolartransistor eindeutig bei hohen Frequenzen, d. h. etwa oberhalb 6 GHz, überlegen. Es wird eingeschätzt, daß in Zukunft der FET, insbesondere unter Verwendung von Galliumarsenid, für rauscharme Empfängervorverstärker bis zu 60 GHz eingesetzt werden kann.

Thyristoren sind gesteuerte Siliziumgleichrichterzellen. Der Aufbau entspricht einer Vierschichtdiode. Zusätzlich zu Katode und Anode ist noch ein weiterer Anschluß (*Gate*, Tor) herausgeführt. Bei kleinen Spannungen fließen nur Sperrströme. Wird die Gleichspannung vergrößert, so steigt der Strom bei Erreichen eines bestimmten Spannungswertes schlagartig an. Arbeitet der Thyristor im positiven Sperrbereich, so braucht dem Gate nur ein Steuerimpuls mit hinreichend großer Amplitude zugeführt werden, um einen hohen Durchlaßstrom zu erhalten; der Thyristor „zündet". Erst bei Absinken des Durchlaßstroms auf einen Wert nahe Null bzw. Absinken der Spannung zwischen Katode und Anode sperrt der Thyristor wieder.

Gunn-Element. Die Wirkungsweise des Gunn-Elements beruht auf dem von *J. B. Gunn* entdeckten Effekt. Dabei kommt es bei hohen elektrischen Feldstärken in bestimmten Halbleitermaterialien zu Interbandstreuungen (Wechseln der Elektronen zwischen 2 Leitungsbändern) und dadurch zu einer negativen differentiellen Driftbeweglichkeit. Das führt zu Instabilitäten im Volumen, die unter bestimmten Bedingungen zur Schwingungserzeugung im Bereich sehr hoher Frequenzen ausgenutzt werden können. Geeignete Materialien sind III-V-Verbindungen, vor allem Galliumarsenid. Gunn-Elemente werden in Oszillatoren von Mikrowellenempfängern und -sendern bei Frequenzen von ≈ 5 GHz bis 20 GHz eingesetzt.

Hall-Effekt-Element. Das Hall-Effekt-Element beruht auf dem von *E. H. Hall* entdeckten Effekt, demzufolge der Stromfluß in bestimmten Halbleitermaterialien, insbesondere Indiumarsenid, durch ein äußeres Magnetfeld gesteuert

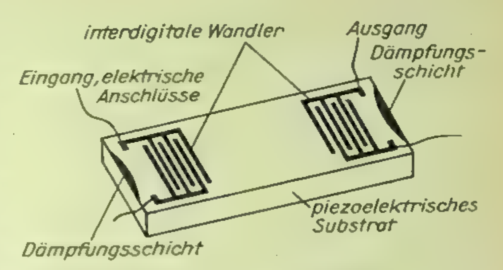


Abb. 11.5.3-7 Akustisches Oberflächenwellenbauelement (AOW)

wird. Hall-Effekt-Elemente dienen vor allem zur Messung von magnetischen Feldstärken.
Physikalisch nicht zu den Halbleiterbauelementen gehören die akustoelektronischen Bauelemente und die Flüssigkristallelemente. Da sie aber technologisch mit den Halbleiterbauelementen Gemeinsamkeiten aufweisen, sollen sie hier mit angeführt werden.

Akustoelektronik. *Akustoelektronische Bauelemente* beruhen in erster Linie auf der Erscheinung, daß sich auf der Oberfläche piezoelektrischer Materialien mit Hilfe elektromechanischer Wandler akustische Oberflächenwellen erregen lassen, daher auch die Bezeichnung „Akustische Oberflächenwellenbauelemente" (*AOW*). Ein dafür geeigneter Wandler besteht aus 2 kamm- bzw. fingerartigen Strukturen, die ineinandergreifen (Interdigitalstruktur, Abb. 11.5.3-7). In der technischen Ausführung besteht diese Struktur aus einer dünnen Metallschicht, die auf dem Substrat liegt. Als Substrat wird i. allg. Quarz oder Lithiumniobat verwendet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwelle ist vom Material abhängig und liegt bei 2 000 bis 3 500 m/s, ist also ≈ 10^5mal kleiner als die Lichtgeschwindigkeit im freien Raum, daher ist auch die akustische Wellenlänge ≈ 10^5mal kleiner (z. B. entspricht eine Wellenlänge von 3 m im freien Raum einer Oberflächenwelle von 30 μm). Aufgrund der geringen Wellenlänge lassen sich mit relativ kleinen Bauelementen große Laufzeiten erreichen. Angewendet werden AOW-Bauelemente vor allem als Verzögerungsleitungen und Bandpaßfilter, letztere z. B. in Zwischenfrequenzfiltern von Fernsehempfängern.
Neben den akustischen Oberflächenwellenbauelementen gibt es noch akustoelektronische Bauelemente, die auf Volumenwellen beruhen; sie haben bisher noch keine praktische Verwendung gefunden.

Flüssigkristallanzeigeelemente. *Flüssigkristalle* sind Substanzen, die sich äußerlich wie Flüssigkeiten, optisch wie Kristalle verhalten. Wird die normalerweise durchsichtige Substanz einem elektrischen Feld ausgesetzt, so wird sie trübe oder sogar undurchsichtig. Dieser Effekt wird

zur Anzeige von alphanumerischen Zeichen und Symbolen ausgenutzt, und zwar entweder nach dem Reflexionsprinzip (Spiegelung bei auffallendem Licht) oder nach dem Transmissionsprinzip (Durchsicht bei rückseitiger Beleuchtung). Im Gegensatz zur Anzeige mit Leuchtdioden benötigen Flüssigkristallelemente stets eine äußere Lichtquelle.
Es gibt auch Anwendungen von Kombinationen akustoelektronischer Bauelemente mit optoelektronischen Bauelementen. Dabei wird z. B. die Änderung des Brechungsindex eines Kristalls durch die von Schallwellen hervorgerufenen Deformationen zur Informationsverarbeitung herangezogen. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Akustooptik*.

11.5.4. Mikroelektronik

Bei Verwendung singulärer Bauelemente steigen mit der Anzahl der Bauelemente Kosten, Volumen und Masse der betreffenden Geräte und Anlagen; außerdem fällt die Zuverlässigkeit umgekehrt proportional zur Anzahl der eingesetzten Bauelemente. Man ist deshalb dazu übergegangen, bestimmte Standardschaltungen zu integrieren, indem mit möglichst wenig technologischen Schritten gleichzeitig eine Vielzahl von Bauelementen erzeugt und funktionsgerecht miteinander verbunden werden. Nach Einbau derartiger integrierter Schaltungen in ein Gehäuse, das mit Anschlußdrähten versehen ist, oder Verkappung mit einem Kunststoffüberzug, lassen sich diese wie singuläre Bauelemente verarbeiten. Durch die Integration sinken Kosten, Volumen und Masse, ferner verbessern sich i. allg. die elektrischen Eigenschaften und die Zuverlässigkeit bleibt in der Größenordnung des Wertes, den ein einzelnes singuläres Bauelement hat. Bei den integrierten Schaltungen ist zwischen hybridintegrierten Schaltungen und monolithisch integrierten Schaltungen, letztere auch als integrierte Schaltkreise bezeichnet, zu unterscheiden.
Hybridintegrierte Schaltung. Eine integrierte Schaltung, deren Bestandteile mit unterschiedlichen Technologien hergestellt wurden, bezeichnet man als hybridintegrierte Schaltung oder *Hybridschaltung*. Sie besteht aus einem isolierenden Trägermaterial, dem *Substrat*, das ein aus passiven Bauelementen und Verbindungsleitungen, den *Leiterbahnen*, gebildetes Netzwerk trägt und in das aktive sowie erforderlichenfalls weitere passive Bauelemente nachträglich eingesetzt werden. Bei hybridintegrierten Schaltungen ist entsprechend den sich durch die unterschiedlichen Herstellungsverfahren ergebenden Schichtdicken zu unterscheiden zwischen Dickschichttechnik (Schichtdicke 15 bis 50 μm) und Dünnschichttechnik (Schichtdicke 0,02 bis 2 μm).
Dickschichttechnik. Bei der Dickschichttechnik, auch *Dickfilmtechnik* genannt, werden auf ein keramisches Substrat Leiterbahnen, Widerstände und Kondensatoren aufgedruckt und anschließend eingebrannt. Als Substrat wird meist Aluminiumoxid benutzt, bei hohen Verlustleistungen auch Berylliumoxid, das eine bessere Wärmeleitung besitzt. Das Bedrucken erfolgt im Siebdruckverfahren; die Siebdruckpasten enthalten ein Keramik-Metall-Gemisch. Das Einbrennen (Sintern) erfolgt bei Temperaturen von 750 bis 1000 °C. Druck- und Sinterprozesse müssen i. allg. in mehreren Schritten erfolgen, da Leiterbahnen, Widerstände, isolierende und dielektrische Schichten, letztere zur Herstellung von Keramikkondensatoren, verschiedenartige Pasten und Sintertemperaturen erfordern. Die Herstellungstoleranzen für Widerstände liegen bei $\pm$ 10%. Zur Erzielung engerer Toleranzen müssen die Widerstände nachträglich mit dem Sandstrahl-, dem Elektronenstrahl- oder dem Laserstrahlverfahren abgeglichen werden. Damit sind Toleranzen bis $\pm$ 0,1% erzielbar. Soweit die Schaltung aktive Bauelemente, z. B. Dioden und Transistoren, benötigt, werden diese nachträglich eingelötet oder eingebondet. Das Einlöten erfolgt bei gekapselten, mit Drahtanschlüssen versehenen Bauelementen, das Einbonden bei Chips. Kondensatoren hoher Kapazität, die sich mit der Schichttechnik nicht herstellen lassen, werden meist als Chip eingefügt. Mit der Dickschichttechnik lassen sich auf 1 cm^2 Substratfläche $\approx$ 5 Bauelemente unterbringen; üblich sind Substratflächen von 1 bis 10 cm^2.
Dünnschichttechnik. Die Dünnschichttechnik, auch *Dünnfilmtechnik* genannt, beruht auf der Herstellung von Schichten mit Hilfe der Vakuumbedampfung, der Katodenzerstäubung oder durch chemische und galvanische Prozesse. Die Dicke der Schicht liegt in der Größenordnung von 0,02 bis 2 μm. Zur Erzeugung der geometrischen Strukturen für Leiterbahnen, Widerstände, Spulen und Kondensatoren wird entweder das Substrat gleichmäßig ganzflächig beschichtet und die Struktur durch anschließendes Herausätzen gebildet oder die Struktur wird unmittelbar mit dem Beschichtungsvorgang gebildet. Bei dem *Verfahren mit ganzflächiger Beschichtung* wird nach der metallischen Beschichtung Fotolack aufgetragen, dieser durch eine Fotomaske belichtet, entwickelt und abgespült. Damit erhält die Lackschicht dort Öffnungen, wo die metallische Schicht entfernt werden soll. Mit einer Ätzflüssigkeit wird die metallische Schicht an den offenen Stellen aufgelöst und es bleibt die gewünschte Struktur stehen. Bei dem *Verfahren mit unmittelbarer Strukturierung* wird das Substrat durch eine Metallfolie hindurch bedampft, die dort Öffnungen hat, wo sich die Metallschicht aufbauen

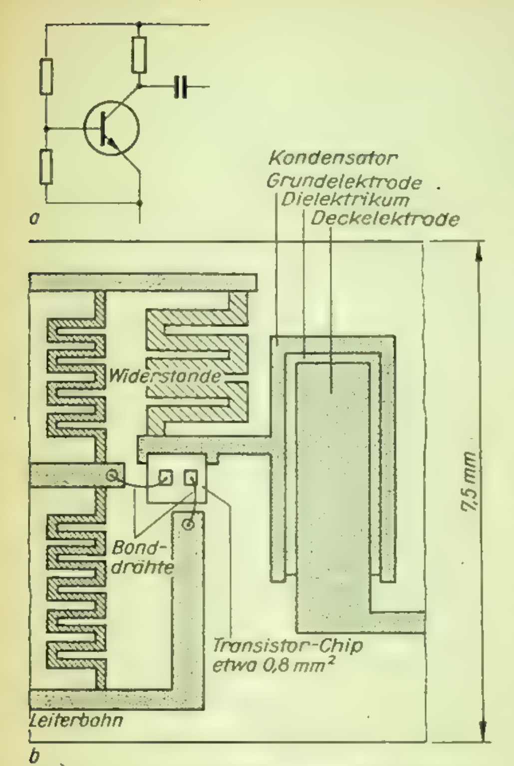


Abb. 11.5.4-1 Dünnschichtschaltung: a Schaltbild, b Aufbau (Draufsicht)

soll. Die Metallfolie selbst wird auf dem Wege der fotolithografischen Ätzung von der Fotomaske ausgehend hergestellt. Als Substratmaterialien haben sich Glas, hochwertige Keramik und Saphir bewährt; neuerdings werden auch organische Substanzen (z. B. glasfaserverstärktes Teflon) verwendet. Die aufzudampfenden Materialien sind Gold, Silber und Kupfer für Leiterbahnen und Spulen, Tantalnitrid und Chromnickel für Widerstände, Tantal- oder Siliziumoxid für Kondensatoren. Wie bei der Dickschichttechnik werden aktive Bauelemente und größere Kondensatoren erforderlichenfalls nachträglich in die Schaltung eingefügt. Mit der Dünnschichttechnik lassen sich auf 1 cm^2 Substratfläche 10 bis 20 Bauelemente unterbringen; üblich sind Substratflächen von 1 bis 6 cm^2 (Abb. 11.5.4-1).

Anwendung hybridintegrierter Schaltungen. Die Dickschichttechnik ist dort von Vorteil, wo anwenderspezifische Schaltungen gefordert und relativ kleine Stückzahlen benötigt werden, weil die Entwicklung und Produktion verhältnismäßig einfach ist und schnell vonstatten geht. Änderungen lassen sich daher schnell durchführen. Anwendungsbeispiele sind Widerstandsnetzwerke in Meßgeräten, Tuner und ZF-Verstärker in Rundfunk- und Fernsehgeräten sowie Antennenverstärker, Reglerbaugruppen in Kraftfahrzeugen, Kühlschränken und Waschautomaten.

Die Dünnschichttechnik ermöglicht die Realisierung wesentlich kleinerer geometrischer Strukturen bzw. die Einhaltung geringerer Toleranzen. Ersteres ergibt eine größere Anzahl von realisierbaren Bauelementen je Flächeneinheit, letzteres ermöglicht Strukturen bis in Frequenzbereiche von 15 GHz. Der Aufwand bei der Herstellung ist wesentlich größer als bei der Dickschichttechnik und lohnt nur bei großen Stückzahlen. Dagegen wird die Dünnschichttechnik vor allem bei hohen Frequenzen angewendet, wobei die Ausführung bevorzugt in Streifenleitungen erfolgt. In diesem Fall ist jedoch das Substrat nicht nur Trägermaterial, sondern es bildet gleichzeitig das Dielektrikum zwischen den Streifenleitungen und der rückseitigen Masse-Metallisierung.

Monolithisch integrierte Schaltung. Bei der monolithisch integrierten Schaltung (auch *i*ntegrierter *S*chaltkreis, IS, engl. IC von *i*ntegrated *c*ircuit, genannt) befinden sich alle zur Schaltung gehörenden aktiven und passiven Schaltungselemente sowie die Verbindungen in oder auf einem gemeinsamen Halbleiterkristall (Abb. 11.5.4-2). Beim gegenwärtigen Stand der Technik wird einkristallines Silizium benutzt. Während bei der Dick- und Dünnschichttechnik das Substrat nur Träger der Strukturierung (mit Ausnahme bei Streifenleitungen) ist, erfüllt es bei monolithischer Technik nicht nur mechanische, sondern auch elektrische Funktionen. Man bezeichnet daher diese Technik auch als Halbleiterblocktechnik. Entsprechend den beiden Transistorprinzipien gibt es bei der monolithisch integrierten Schaltung die Bipolartechnik und die MIS- bzw. MOS-Technik (s. S. 404).

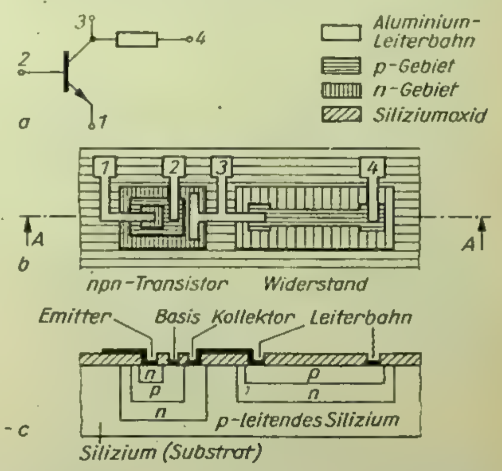


Abb. 11.5.4-2 Einfache monolithisch integrierte Schaltung: a Schaltbild, b Aufbau (Draufsicht, ohne Siliziumoxidschicht), c Querschnitt A-A

Bipolartechnik. Grundlage dieser Technik ist das Prinzip des Bipolartransistors. Als Herstellungsverfahren wird die Epitaxieplanartechnologie angewendet. Ganz allgemein gilt, daß die Bauelemente in Bipolartechnik durch passend gestaltete, dotierte Halbleiterschichten, die *pn*- oder Dichteübergänge bilden, realisiert werden. Dazu ist notwendig, in aufeinanderfolgenden Prozeßschritten an bestimmten Stellen des Halbleiterkristalls Störstellen, z. B. durch Diffusion, einzubringen, an anderen Stellen dagegen nicht. Diese selektive Eindiffusion von Störstellen wird durch die *Maskentechnik* ermöglicht. Als diffusionshemmende Maske kann bei Silizium die natürliche Siliziumoxidschicht dienen, die den Siliziumkristall umgibt und deren Bildung noch durch genau festgelegte Oxydationsprozesse gefördert wird. Um eine bestimmte geometrische Form der einzudiffundierenden Schichten zu erhalten, wird das Siliziumoxid an den gewünschten Stellen durch ein fotolithografisches Verfahren *(Fotoätztechnik)* entfernt. Bei der Bipolartechnik müssen die Bauelemente im Halbleiterkristall potentialmäßig voneinander getrennt sein. Das wird durch die Erzeugung sog. isolierter Inseln durch *pn*-Übergänge erreicht, indem z. B. in einem *p*-Halbleiterplättchen *n*-leitende Inseln hergestellt werden, in denen dann die Realisierung der einzelnen Bauelemente erfolgt. Widerstände in Bipolartechnik entstehen durch Eindiffusion von Halbleiterschichten, d. h. *p*-leitenden Schichten in *n*-leitende Inseln. Als Kapazitäten werden die Sperrschichtkapazitäten der *pn*-Übergänge ausgenutzt. Als Transistoren werden Planartransistoren mit verschiedener geometrischer Struktur realisiert. Wesentlich ist, daß sich bei der monolithisch integrierten

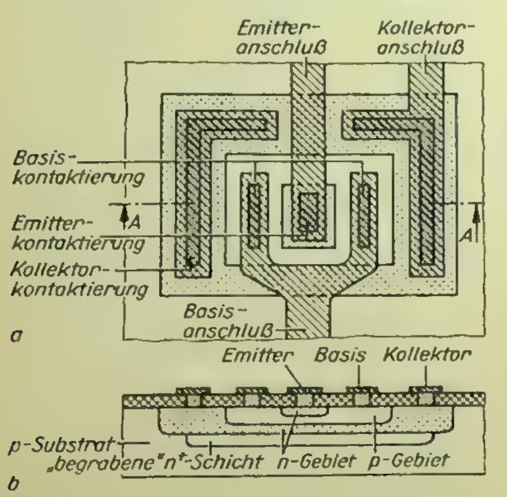


Abb. 11.5.4-3 Planartransistor in Zweistreifenstruktur: a Draufsicht, b Querschnitt A-A

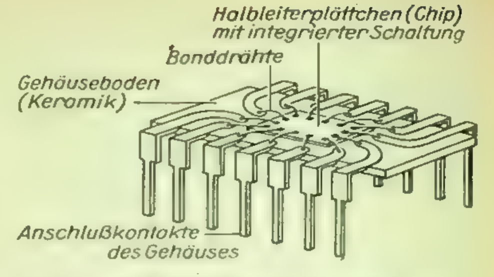


Abb. 11.5.4-4 Monolithisch integrierte Schaltung, auch integrierter Schaltkreis genannt, ohne Gehäuse

Schaltung alle Anschlüsse auf der Oberseite des Substrats befinden müssen (Abb. 11.5.4-3).
Zur Herstellung einer integrierten Schaltung in Bipolartechnik sind viele nacheinander auszuführende Prozeßschritte erforderlich. Ausgangsmaterial ist eine *p*-Siliziumscheibe. An den Stellen, an denen Transistoren eingebaut werden sollen, wird eine „begrabene" n^+-Schicht eindiffundiert. Anschließend wird eine dünne (5 bis 25 μm) *n*-leitende Epitaxieschicht erzeugt. In einem weiteren Prozeßschritt werden entsprechend dem Schaltungskonzept isolierte *n*-Inseln geschaffen. Das geschieht so, daß mit Hilfe der Fotolithografie von oben *p*-leitende Wände eindiffundiert werden. Nach der Erzeugung dieser *n*-Inseln erfolgt die Basisdiffusion, gleichzeitig werden sämtliche Widerstände hergestellt. Nach der Basisdiffusion erfolgt die Emitterdiffusion. Bei diesem Prozeßschritt wird eine stark leitende *n*-Schicht eingebracht. Gleichzeitig mit der Emitterdiffusion werden zur besseren Kontaktierung des Kollektors in das Kollektorgebiet geschlossene Kontaktstreifen eindiffundiert. Schließlich erfolgt die Metallisierung zur Herstellung der erforderlichen Verbindungen der Bauelemente und die Leitungsführung zu den Bondinseln. Das Halbleiterplättchen (Chip) mit einer Größe von beispielsweise 1 mm² wird auf eine Keramikplatte des Gehäuses gesetzt oder es wird mit Plast umspritzt. Zur Verbindung mit den Anschlußkontakten des Gehäuses werden an den Bondinseln dünne Gold- oder Aluminiumdrähte (7,5 bis 10 μm Durchmesser durch Thermokompression (Bonden) befestigt (Abb. 11.5.4-4).
MOS-Technik. Grundlage dieser Technik ist das MOSFET-Prinzip. Mit dem MOSFET werden sämtliche erforderlichen Bauelementefunktionen, d. h. Transistor-, Widerstands- und Kapazitätsfunktion, realisiert. Als Transistortyp kommt nur der Anreicherungstyp, und zwar *p*- oder *n*-Kanal-Typ, in Frage, weil er selbstisolierend ist, d. h., es treten unter normalen Bedingungen keine Kopplungen zwischen den integrierten Bauelementen auf. Deshalb sind in der MOS-Technik keine isolierenden Inseln wie bei der Bipolartechnik erforderlich, was die Herstellung wesentlich vereinfacht. Die integrierten MOS-Schaltun-

gen sind meist in Streifenstruktur ausgeführt. Für die Herstellung gibt es 2 Möglichkeiten: die Metall-Tor- und die Silizium-Tor-Technologie. Ausgangsmaterial ist für beide Varianten beim *n*-Kanal-Typ ein Siliziumplättchen. Der wesentliche Vorteil der MOS-Technik ist, daß bei ihr je Bauelement weniger Chip-Fläche benötigt wird als bei der Bipolartechnik, außerdem ist die Anzahl der benötigten Prozeßschritte zur Herstellung geringer, so daß integrierte MOS-Schaltungen billiger sind.

Die im Zuge der Weiterentwicklung geforderte Realisierung von Strukturen mit noch geringeren Abmessungen und kleineren Toleranzen hat bei der Diffusions- und Ätztechnik, wie sie bisher benutzt wurde, gewisse Grenzen. Einen wesentlichen Fortschritt bringt die *Ionenimplantation*, bei der das Substrat zur Dotierung mit Ionen beschossen wird. Mit der Ionenimplantationstechnik lassen sich großflächig engere Toleranzen in Dotierung und Tiefe einstellen, als dies mit der Epitaxie möglich ist. Weitere Fortschritte können durch Einsatz der *Elektronenstrahlätzung*, bei der die Ätzung durch Elektronenbeschuß erfolgt, und der *Laserstrahlätzung*, die mit Laserimpulsen hoher Energiedichte arbeitet, erzielt werden.

Klassifizierung der integrierten Schaltungen. In der Informationstechnik gibt es analoge und digitale Signale (vgl. 11.4.1.). Zur Verarbeitung analoger Signale sind Schaltungen erforderlich, die durch lineare Kennlinien gekennzeichnet sind. Die Verarbeitung von Binärsignalen erfolgt mit Hilfe von Schaltungen, die nur 2 Signalpegelstufen, beispielsweise niedriger Pegel (L) und hoher Pegel (H), kennen. Auf Binärsignalen beruht die elektronische Rechentechnik (vgl. 14.3.2.). Die monolithisch integrierten Digitalschaltungen, auch als Digitalschaltkreise bezeichnet, die zur Ausübung logischer Funktionen bestimmt sind, lassen sich zu Familien mit bestimmten Eigenschaften zusammenfassen:

RTL	Schaltung enthält Widerstände (*R*) und Transistoren (*T*), hat nur noch geringe praktische Bedeutung.
DTL	Schaltung enthält Dioden (*D*) und Transistoren (*T*), hat ebenfalls nur noch geringe Bedeutung.
TTL	Schaltung enthält einfache Transistoren, Transistoren mit vielen Emittern und ein Minimum an Widerständen. Für monolithisch integrierte Schaltungen sehr gut geeignet und z. Z. am meisten angewendet.
DCTL	direkt(D)gekoppelte (C) Transistor-(T)-Logik (L). Schaltung enthält Widerstände und Transistoren. Die logische Verknüpfung erfolgt über die Transistoren.

ECTL	Emitter-(E)gekoppelte (C) Transistor-(T)-Logik (L). Schaltung enthält Widerstände und Transistoren. Die logische Verknüpfung erfolgt über gemeinsamen Emitterwiderstand. Weist außerordentlich geringe Schaltzeiten auf und hat daher für die Zukunft hohe Bedeutung.

Großintegration. Die fortschreitende Entwicklung der monolithisch integrierten Schaltungen geht kontinuierlich zu einem immer höheren Integrationsgrad, der durch die Anzahl der je Chip integrierten sog. Transistorfunktionen ausgedrückt wird. Unter *Transistorfunktion* versteht man die Summe der integrierten Transistoren, Dioden, Kondensatoren oder der entsprechenden Funktionselemente bei verschmolzenen Funktionen, wie z. B. Multiemittertransistoren. Integrierte Schaltungen mit einem hohen Integrationsgrad werden als Großintegration (*L*arge *S*cale *I*ntegration, LSI) bezeichnet. Die ersten integrierten Schaltungen hatten um 1960 3 Transistorfunktionen je Chip, 1978 waren es $\approx 5 \cdot 10^4$ bei 25 mm^2 Chipfläche, und 1979 wurden bei ladungsgekoppelten Bauelementen bereits 10^5 Transistorfunktionen auf einen Chip erreicht.

Ein typisches Beispiel für die Großintegration ist der Mikroprozessor. Ein *Mikroprozessor* ist eine monolithisch integrierte Schaltung, die auf einem einzigen Chip alle Funktionsblöcke vereinigt, die zur Durchführung sämtlicher arithmetischer und logischer Operationen, entsprechend einem vom Programmspeicher vorgegebenen Befehlsablauf, notwendig sind. Damit entspricht der Mikroprozessor im Prinzip einer Zentraleinheit eines konventionellen Rechners (vgl. 14.3.3.). Außerdem verfügt der Mikroprozessor über die erforderlichen Anschlußstellen für den Daten- und Befehlstransport von und zur Peripherie und über Funktionsgruppen zum Verkehr mit externen Halbleiterspeichern (Abb. 11.5.4-5) Typische Kennwerte moderner Mikroprozessoren sind: Wortlänge 8 bit, Zykluszeit je nach angewandter Halbleitertechnologie 0,2 bis 2 μs, minimale Zeit für Instruktionen 2 bis 10 μs, Befehlsvorrat 48 bis 72. Die ersten Mikroprozessoren wurden in *p*-Kanal-MOS-Technik ausgeführt, z. Z. wird überwiegend die schnellere *n*-Kanal-MOS-Technik angewendet. Eine weitere Verringerung der Zykluszeit wird erreicht durch Anwendung der Schottky-Bipolartechnik bzw. der Integrierten Injektions-Logik (I^{2}L).

Zu einem vollständigen Mikroprozessorsystem gehören noch Festwertspeicher (engl. *r*ead *o*nly *m*emory, ROM, vgl. 14.3.3.), Schreib-Lese-Speicher (engl. *r*andom *a*ccess *m*emory, RAM) und eine Ein/Ausgabeeinheit. Die Speicher sind meist in MOS-Technik (vgl. 11.5.3.) ausgeführt

und wie der Mikroprozessor je auf einem Chip untergebracht.
Aufgrund des außerordentlich günstigen Verhältnisses von Kosten zu Leistung hat der Mikroprozessor (vgl. 14.3.3.) in verhältnismäßig kurzer Zeit eine breite Anwendung gefunden. In erster Linie wird er als Zentraleinheit in Mikrorechnern eingesetzt. Darüber hinaus sind folgende Anwendungsbeispiele zu nennen: Datenaufbereitung bei dezentralisierter Informationsverarbeitung, programmgesteuerte Meßtechnik, Meßdatenverarbeitung, adaptive Steuerung (vgl. 8.3.2.), medizinische Überwachung und Auswertung, Steuerung von Werkzeugmaschinen, Zündsteuerung in Kraftfahrzeugen u. a.

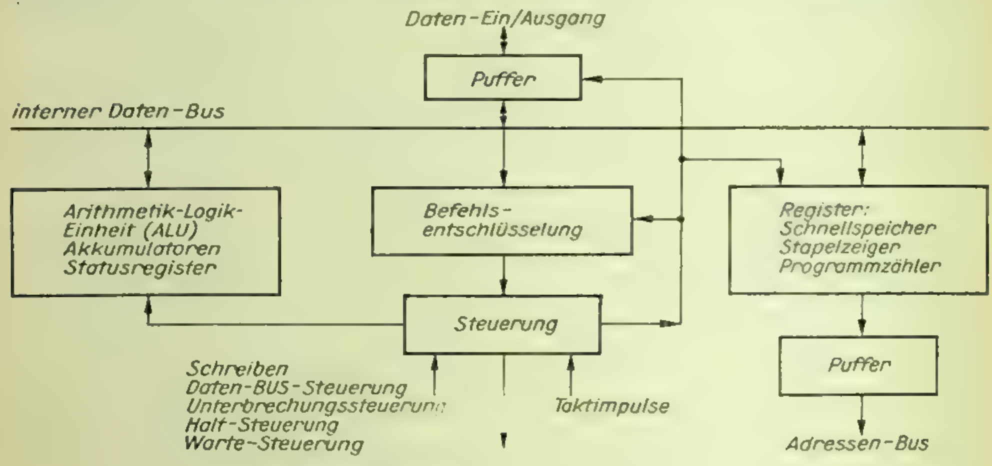


Abb. 11.5.4-5 Struktur eines Mikroprozessors

11.5.5. Optoelektronik

In der Optoelektronik werden elektronische Funktionen durch Wechselwirkung von Elektronen mit elektromagnetischer Strahlung bewirkt. Dazu bedient man sich optisch-elektrischer und elektrisch-optischer Energiewandler. Optisch-elektrische Energiewandler sind z. B. Fotodioden, Solarzellen usw. (vgl. 11.5.3.), elektrisch-optische Energiewandler sind z. B. Lumineszenzdioden, insbesondere Leuchtdioden, Laserdioden usw. (vgl. 11.5.3.).
Optokoppler sind Bauelemente, in denen beide Wandlertypen kombiniert sind. Sie gestatten eine rückwirkungsfreie Signalübertragung vom Eingang zum Ausgang, wobei sich das Licht gegebenenfalls noch z. B. durch Flüssigkristallzellen (vgl. 11.5.3.) steuern läßt.

Zur Optoelektronik rechnet man auch die Informationsübertragung mit optischen Mitteln, insbesondere mit Lichtleitern (vgl. 11.4.).
Im weiteren Sinne bezeichnet man auch z. B. die in der Fernsehtechnik verwendeten Bildaufnahme- und Bildwiedergaberöhren, gegebenenfalls sogar Glühlampen, Leuchtstofflampen usw., als optoelektronische Geräte. Die Optoelektronik befaßt sich ferner mit der Strukturerkennung von zwei- und mehrdimensionalen Objekten, z. B. mit der automatischen Zeichenerkennung. Beispielsweise kann mit matrixförmigen Anordnungen von Fotodioden Schrift gelesen werden.
Mit der Kombination optoelektronischer Bauelemente und Verfahren mit akustoelektronischen Bauelementen (vgl. 11.5.3.) befaßt sich die *Akustooptik*. In akustooptischen integrierten Festkörperschaltkreisen wird z. B. die Änderung des Brechungsindex eines Kristalls unter dem Einfluß von Schallwellen zur Steuerung elektromagnetischer Wellen für Verstärker u. a. Funktionen ausgenutzt.

12. Feinmechanik — Optik — Medizintechnik

Kennzeichnend für diese Bereiche der Technik sind die hohe Präzision der Fertigung, kleinste Toleranzen sowie spezielle Forderungen für die Fertigung und den Umgang mit den Erzeugnissen, z. B. bezüglich Sauberkeit, klimatischen Bedingungen u. a. Während bis in die jüngste Vergangenheit mechanische Mittel dominierten, dringt auch in diese Gebiete immer mehr die Elektronik ein. Insbesondere mikroelektronische Bauelemente (vgl. 11.5.4.) werden in zunehmendem Maße verwendet, sei es als Uhrenschaltkreise, kleine und mittlere Rechner für Bürozwecke oder in der Medizintechnik, vor allem auch in der medizinischen Elektronik (vgl. 12.4.7.). Aber auch optische Geräte werden oft z. B. entweder mit Mikrorechnern gesteuert oder enthalten elektronische Baugruppen, z. B. der Laser (vgl. 12.3.4.). Das unmittelbare Zwischenglied zwischen Optik und Elektronik bildet schließlich die Optoelektronik (vgl. 11.5.5.).

12.1. Uhren

Zeit gehört zu den physikalischen Grundgrößen. Sie muß ständig durch Beobachtungen und Messungen bestimmt werden. Regelmäßig wiederkehrende astronomische Vorgänge dienen der *Zeitbestimmung*. Zwischen den Himmelsbeobachtungen übernehmen Uhren die *Zeitangabe*. Die Angabe erfolgt mit einem Zifferblatt oder auch durch digitale Anzeige (*Digitaluhr*). Zugleich messen sie den *Zeitablauf* und teilen den Tag in Stunden, Minuten, Sekunden usw. Als physikalisch-technische Einheit gilt die Sekunde. 1 s ist die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung des Zäsiumisotops 133.

12.1.1. Mechanische Uhren

Zeit wird meßbar, wenn ununterbrochene, gleichlange Bewegungen schwingender Körper aneinandergereiht und registriert werden. Diese Aufgabe führen Uhren aus. *Energiespeicher* mechanischer Uhren sind Zugfeder oder -gewicht. Sie versetzen das *Räderwerk*, das zwischen den Werkplatten des *Gestells* gelagert ist, in Drehung. Als zeitbestimmendes Glied dient ein *Schwingsystem* (Pendel oder Unruh mit Spirale). Die *Hemmung* überträgt das Drehmoment des Räderwerks impulsartig auf den Schwinger, wodurch der zeitliche Ablauf des Uhrwerks geregelt wird. Ein mit dem Räderwerk gekuppeltes *Zeigerwerk* ermöglicht die Zeitanzeige am Zifferblatt.

Zuggewichte werden in Präzisions-Pendeluhren und einfachen Wanduhren verwendet. Die aufgezogenen Massestücke ziehen über eine Kette oder Saite an der Walze des Antriebsrads. Die Zugkraft bleibt im Unterschied zur Zugfeder bis zum Ablauf konstant, wodurch ein gleichmäßiges Zeitmeßergebnis erzielt wird.

Zugfedern bestehen aus flachem Stahlband, das um eine Federwelle gewunden und am Federkern in einem Haken eingehängt ist. Wird beim Aufzug die Welle gedreht, spannt sich die Feder, da ihr freies Ende mit dem *Antriebsrad* (*Federhaus*) verbunden ist. Sie entspannt sich wieder beim Drehen des Federhauses und liefert das benötigte Drehmoment über das Räderwerk zum Antrieb des Schwingsystems. In tragbaren Kleinuhren werden „unzerbrechliche" Zugfedern verwendet: *Texturstahlfedern* aus hochwertigem Stahl, der durch hohen Walzdruck in Bandrichtung eine Strukturveränderung erfahren hat. Sie überstehen ≈ 4000 Aufzüge, das sind rund 10 Jahre Betriebsdauer. *Nivaflex*-Zugfedern werden aus hochwertigem rostfreiem, antimagnetischem Legierungsmetall gewalzt und überdauern ≈ 10^4 Aufzüge.

Aufzug. Beim Aufziehen wird mechanische Energie gespeichert. Großuhren werden mit dem Uhrschlüssel aufgezogen. Das *Gesperr* (Sperrad, Klinke, Sperrfeder) läßt nur eine Drehrichtung — die Aufzugsrichtung — zu und verhindert das Zurückschlagen der Welle. Bei Taschen- und Armbanduhren wird die *Krone* mit den Fingern gedreht; dadurch werden über eine *Aufzugswelle* die Aufzugsräder bewegt, die in das Sperrad eingreifen und damit die Federwelle zum Spannen der Zugfeder drehen. Zum Zeigerstellen wird die Krone gezogen. Dabei schwenkt ein Hebel die Aufzugsräder aus

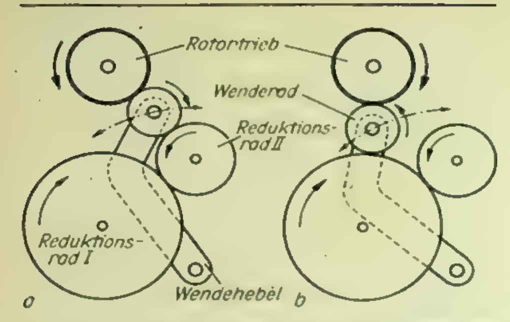


*Abb. 12.1.1-1 Wendegetriebe eines Automatikaufzugs in den aus den Drehrichtungen des Rotors sich ergebenden Stellungen **a** und **b***

dem Sperrad heraus und kuppelt sie mit dem Zeigerstellrad. Dadurch überträgt sich die Drehbewegung der Krone auf das *Zeigerwerk*, und man kann die Zeiger stellen. Nach der Konstruktion werden *Kupplungsaufzüge* (in guten Uhren) und *Wippenaufzüge* (in einfachen oder sehr kleinen Uhren) unterschieden.

Automatikaufzug wird bei der Armbanduhr mit hohem Gebrauchswert verwendet. Eine zentrisch über dem Uhrwerk gelagerte *Schwingmasse* (*Rotor*) wird durch die verschiedenen Stellungen bei der Armbewegung ständig nach unten gezogen. Die beiderseitigen Pendel- und Drehbewegungen wirken auf ein *Wendegetriebe* (Abb. 12.1.1-1), das zusätzlich zum möglichen Handaufzug in das Sperrad eingreift und die Zugfeder spannt. Eine technologische Vereinfachung wird durch einseitig wirkenden Antrieb erzielt. Das Drehmoment ist konstant, wodurch die Uhr sehr gute Zeitmeßergebnisse zeigt. Die Aufzugskraft des Rotors wirkt auch nach dem Vollaufzug der Zugfeder weiter. Um die Zerstörung des Aufzuggetriebes zu vermeiden, hat die Zugfeder deshalb eine *Rutschkupplung* (*Gleitzaum*), die an der Federhauswand entlanggleitet, wenn voll aufgezogen ist.

Räderwerk. Es überträgt das Drehmoment der Zugfeder auf das Schwingsystem, damit die Schwingungen gleichmäßig und störungsfrei erfolgen können. Die Anzahl der Schwingungen in einer bestimmten Zeiteinheit müssen registriert und als Zeitablauf erkennbar werden. Träger beider Funktionen ist das Räderwerk. In Kleinuhren besteht es aus der *Antriebsgruppe* mit dem Antriebsrad und dem Minutenradtrieb, der *Mittelgruppe* mit Minutenrad, Kleinbodenrad und dem Sekundenradtrieb. Die *Hemmungsgruppe* umfaßt Sekunden- und Ankerrad.

Mit dem Minutenrad sind die Räder des *Zeigerwerks* verbunden. Das *Minutenrohr* steht mit der Welle des Minutenrads in Reibungskupplung und trägt den *Minutenzeiger*. Über ein Wechselrad wird ein lose auf dem Minutenrohr sitzendes Stundenrad gesteuert, auf dem der *Stundenzeiger* sitzt.

Die Wellen der Räder und die Triebe bestehen aus gehärtetem und hochglanzpoliertem Stahl. Sie laufen mit ihren *Zapfen*, winzigen Ansätzen an den Wellenenden, in Lagern des Gestells, die bei guten Uhren synthetische Korunde (Rubine) sind. Dadurch wird lange Haltbarkeit des Uhrenöls und geringste Lagerreibung erreicht. Infolge hoher Übersetzungszahlen müssen die Räder und Triebe die korrigierte Zykloidenverzahnung haben.

Hemmung. Das Räderwerk läuft nach dem Aufziehen ungehindert ab, wenn nicht das Ankerrad von einem hebelartigen Sperrteil (*Anker*) gehemmt wird. Bedingt durch den Anker bewegt sich das Ankerrad Zahn für Zahn im Rhythmus des Schwingsystems und gibt schrittweise impulsförmige Bewegungsenergie frei.

Freie Hemmungen werden unterschieden in *Stiftanker-* und *Palettenankerhemmung*. Bei der Stiftankerhemmung (Wecker und preisgünstige Armbanduhren) ragen 2 kleine dünne Stahlstiftchen aus dem Anker und bewirken den Schaltvorgang mit dem Ankerradzahn (Abb. 12.1.1-2). Diesen Vorgang führen bei der Palettenankerhemmung kräftige Paletten (Klauen) aus, die aus Rubinen bestehen (Abb. 12.1.1-3).

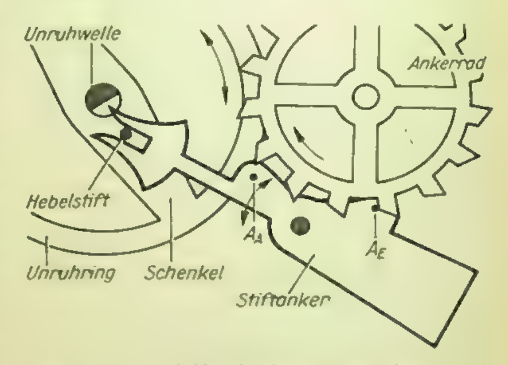


***Abb. 12.1.1-2** Stiftankerhemmung (ohne Spiralfeder dargestellt)*

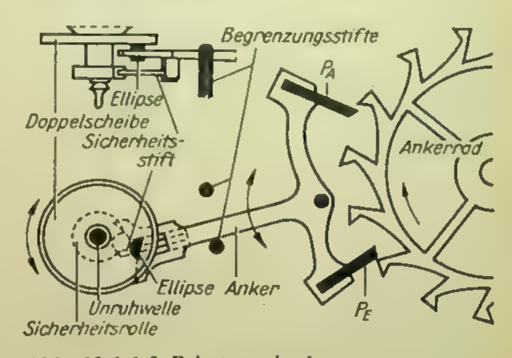


***Abb. 12.1.1-3** Palettenankerhemmung*

Schwingsystem. In ortsfesten Uhren verwendet man ein in einer Ebene schwingendes *Pendel*. Die Unruh mit der Spirale dagegen hält die Uhr in jeder Lage funktionsfähig. Sie hat die Form eines Reifens und wird durch den Anker über einen Hebelstein (Ellipse) zur Drehbewegung angeregt. Dabei spannt sich die Spiralfeder und zwingt die Unruh zurückzuschwingen. Durch den Einsatz hochwertiger Nickelstahllegierungen, z. B. „Nivarox" für Spiralen und Unruhen, werden störende Einflüsse auf die Genauigkeit der Zeitmessung bei Temperaturdifferenzen gemindert.

Schlagwerkuhren und **Normalwecker** werden mit einem zusätzlichen Räderwerk und eigener Zugfeder ausgestattet. Vom Zeigerwerk aus erfolgt nach bestimmten Zeitabschnitten die Auslösung, und ein akustisches Signal erklingt. *Kurzzeitwecker* werden für eine gewünschte Zeitdauer in Gang gesetzt; nach deren Ablauf schaltet sich das Uhrwerk aus und gibt ein Weckwerk frei, das von der gleichen Zugfeder gesteuert wird.

Stoppuhren erfassen kurz begrenzte Vorgänge im Sport, Labor u. a., wobei Beginn und Ende der Messung durch Druck auf die Krone bestimmt werden. Durch dieses Drücken wird über Hebel die Unruh freigegeben bzw. wieder blokkiert. Ein *Chronograf* ist eine Kombination von normaler und Stoppuhr.

12.1.2. Elektrisch gesteuerte Uhren

Werden die Energiespeicher (Zuggewicht, Zugfeder) der mechanischen Uhr durch Wirkungen des elektrischen Stroms mit Hilfe von Zusatzeinrichtungen, wie Elektromagnet mit Klappanker oder kleinem Motor, in Intervallen mit Antriebsenergie geladen, dann handelt es sich um elektrische Uhren mit *indirektem Antrieb*. Das Schwingsystem erhält gleichbleibende Antriebsimpulse über das Räderwerk und die Hemmung. Turmuhren, Hauptuhren in Uhrenanlagen und Wohnraumuhren können mit diesen elektrischen Aufzugsvorrichtungen ausgerüstet werden, die über Kontakteinrichtungen vom Uhrwerk aus zu steuern sind.

Bei elektrisch gesteuerten Uhren mit *direktem Antrieb* entfällt der mechanische Energiespeicher. Das Schwingsystem erhält durch gesteuerte Elektromagnetfelder in Verbindung mit Dauermagneten bei jeder Schwingung direkt den Antriebsimpuls. Die Schwingerbewegung löst einen Fortschaltvorgang für Räder aus, deren Aufgabe es ist, über das Zeigerwerk die Zeitanzeige zu bestimmen. Die Steuerung erfolgt über mechanische Kontakte (elektrische Uhr) oder kontaktlos über Halbleiterbauelemente (elektronische Uhr).

Nach der Art des Schwingsystems bei elektrisch gesteuerten Uhren mit direktem Antrieb wird unterschieden zwischen *Uhren mit Pendel- oder Unruhmotor, Uhren mit schwingergesteuertem Konstantimpuls, Stimmgabel-* und *Quarzuhren*.

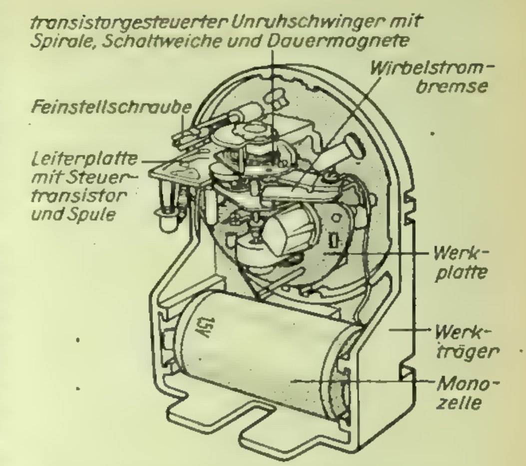


Abb. 12.1.2-1 Elektrodynamisch betriebenes Uhrwerk (UKR-Kal. 46)

Elektrische Gebrauchsuhren, wie Wohnraum- und Armbanduhren, sind meist netzunabhängig. Die Spannungsquellen sind *Leak-Proof-Monozellen* vom Typ R 20 oder R 14 bzw. *Silberoxid-Minizellen* für Kleinuhren mit 1,5 V Zellenspannung. Die Zellen reichen für eine Betriebsdauer der Uhr von 12 bis 18 Monaten.

Kontaktlos gesteuerte Uhrenantriebe für Wohnraumuhren bestehen z. B. aus einem zweiteiligen *unruhähnlichen Drehschwinger* mit 2 hochkoerzitiven Dauermagneten und einer Spirale. Dieser läuft so, daß die *Leiterplatte* mit 2 Spulen dazwischen in der Mitte steht. Die Leiterplatte enthält die Bauelemente der elektronischen Steuerschaltung mit dem Transistor. Die Steuerspule ist an der Basis, die Arbeitsspule an der Kollektor-Emitter-Strecke angeschlossen. Bei der Bewegung des Schwingsystems wird in der *Steuerspule* eine positive Spannung induziert. Der Transistor öffnet. In der *Arbeitsspule* baut sich kurzfristig ein Magnetfeld auf, das auf die Dauermagneten des Schwingers anziehend bzw. abstoßend wirkt. Bei jeder durch die Spiralfeder erzeugten Hin- und Herbewegung wird über eine *Schaltweiche* das Schaltrad vorwärtsbewegt und damit das Zeigerwerk zur Zeitanzeige gesteuert (Abb. 12.1.2-1).

Direkter kontaktgesteuerter Antrieb liegt vor, wenn z. B. bei elektrischen Armbanduhren das Schwingsystem durch elektromagnetische Kräfte in Bewegung versetzt wird. Durch mechanische Kontaktsteuerung werden Stromimpulse von ≈ 8 ms Dauer auf die auf der Unruh befestigte Spule geleitet. Es entsteht ein Magnetfeld, das abstoßend auf 2 Dauermagneten wirkt, die sich in der Werkplatte befinden. Bei diesem Uhrentyp erfolgen stündlich 14400 Kontakt-

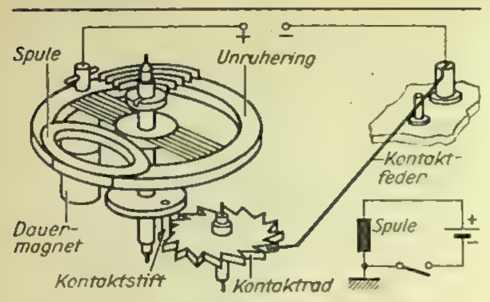


Abb. 12.1.2-2 *Unruhmotor („ruhla elektric". Kal. 26)*

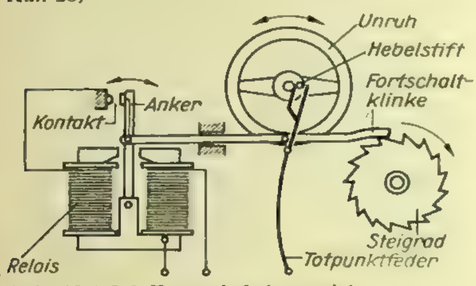


Abb. 12.1.2-3 *Totpunktfederantrieb (elektrochron)*

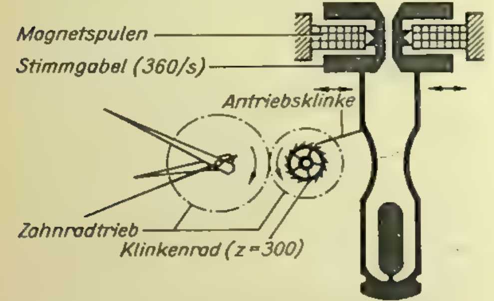


Abb. 12.1.2-4 *Antriebsmechanismus einer Stimmgabeluhr („Accutron")*

schließungen über ein sich selbstreinigendes *Schleifkontaktsystem* (Abb. 12.1.2-2).

Uhren mit schwingergesteuertem Konstantimpuls haben als Schwingsystem die Unruh mit Spirale. Über einen „*Totfederantrieb*" erhält der Schwinger den Antriebsimpuls. Diese Totpunktfeder wird durch ein polarisiertes Relais bei jeder Unruhschwingung gespannt. Die einschwingende Unruh entlädt diese Feder, die dabei ihrerseits einen *konstanten Impuls* an die Unruh abgibt. Bei der erneuten Aufladung der Feder durch das Relais wird gleichzeitig ein Bewegungsschritt auf das Räderwerk für die Zeitangabe vermittelt (Abb. 12.1.2-3).

Stimmgabeluhren sind elektronische Armbanduhren mit höherfrequentem Schwingsystem, das durch einen Elektromagneten direkt angetrieben wird. Die Stimmgabel als Schwinger ist ein Feder-Masse-System, das über Magnetspulen zum Schwingen angeregt wird. Ein Transistorschaltkreis übernimmt die Steuerung der Schalterfunktion. Durch das *Antriebsklinkensystem* wird bei jeder Stimmgabelschwingung der Zahn des Klinkenrads, das den Zeitanzeigemechanismus bewegt, weitergeschoben (Abb. 12.1.2-4).

Quarzuhren enthalten als Schwingsystem ein Plättchen aus reinstem Quarzkristall, das durch einen transistorgesteuerten Schwingkreis zum Schwingen angeregt wird. Dieser *Quarzoszillator* erzeugt eine sehr hohe frequenzstabile Wechselspannung, die nach Verstärkung über integrierte *Frequenzteilerschaltungen (Teilerstufen)* geleitet und auf eine niedrige Frequenz untersetzt wird. Der elektromechanische *Wandler* setzt die Frequenzen nach erneuter Verstärkung in mechanische Impulsfolgen um, die die Zeitanzeige ermöglichen, bzw. es werden *Flüssigkristallanzeigeelemente* oder auch *Lumineszenzdioden* (vgl. 11.5.3.) zur digitalen Zeitangabe (Digitaluhren) gesteuert. Man unterscheidet zwischen *Präzisionsquarzuhren* für wissenschaftliche Aufgaben mit höchster Genauigkeit, *transportable Quarzuhren* für Institute und Industrie sowie zur Steuerung von Uhrenanlagen mit Nebenuhren, tragbare *netzunabhängige Quarzuhren*, die als Marinechronometer oder als Wohnraumuhren

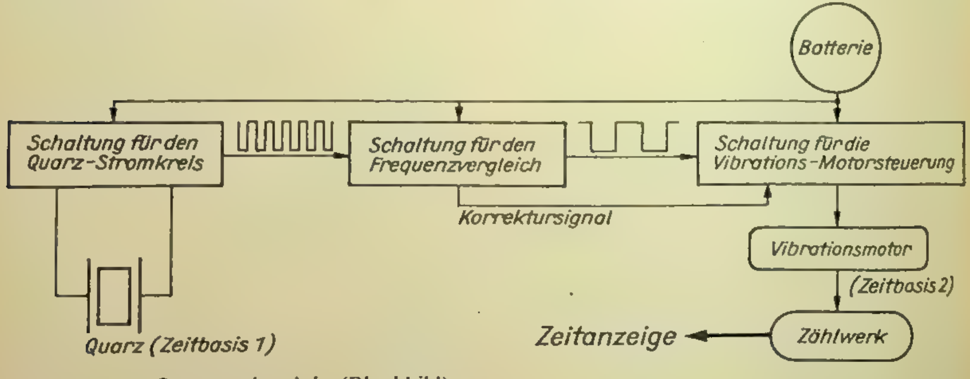


Abb. 12.1.2-5 *Quarzarmbanduhr (Blockbild)*

eingesetzt werden, und *Quarzarmbanduhren*. Die Gangungenauigkeit der Quarzuhr liegt in Abhängigkeit vom Aufwand zwischen 1 min/Jahr und 1 s in 300 Jahren (Abb. 12.1.2-5).
Bei digitalen Quarzarmbanduhren muß die gesamte Schaltung (einschließlich der Steuerung der Digitalanzeige) auf kleinstem Raum zusammengefaßt sein. Das wird durch Verwendung von *Uhrenschaltkreisen*, das sind spezielle integrierte Schaltkreise (vgl. 11.5.4.), realisiert.

12.1.3. Atomuhren

Atom- oder Moleküluhren sind komplizierte hochfrequenztechnische Anordnungen zur Zeitmessung mit höchster Genauigkeit. Bei den Atomuhren wird die Zeitmessung an einen atomphysikalischen Vorgang angeschlossen. Als (Vergleichs-)Normal dient dabei die Resonanzfrequenz bestimmter Atom- oder Molekülschwingungen bzw. -übergänge. In der Regel werden Atomuhren zur Kontrolle und Steuerung von Quarzuhren (vgl. 12.1.2.) verwendet. Eine Atomuhr kann nach dem Maserprinzip (vgl. 12.3.4.) arbeiten oder die Absorption einer besonders starken Absorptionslinie ausnutzen. So hat z. B. das Ammoniakmolekül Schwingungszustände, die sog. Inversionsschwingungen, deren Frequenzen im Bereich der technisch gut erzeugbaren Mikrowellen liegen. Besonders stark ist die Absorptionslinie bei der Frequenz von $\nu = 2{,}387\,04 \cdot 10^{10}$ Hz. Diese Linie wird bei der ersten 1949 entwickelten Atomuhr, der sog. Ammoniakuhr, mit der Schwingung eines Quarzkristalls einer Quarzuhr verglichen. Dazu wird die Quarzschwingung geeignet vervielfacht und die Frequenz des Schwingquarzes auf die Frequenz der Inversionslinie stabilisiert. Die mit dieser Anordnung erreichte Genauigkeit beträgt $3 \cdot 10^{-9}$. Die Zäsiumuhr stellt eine verbesserte Anordnung dar und beruht auf dem Prinzip einer magnetischen Resonanzanordnung, bei der als Standard die Frequenz von 9 192 631 770 Hz dient (vgl. 12.1.). Diese entspricht einem Hyperfeinstrukturübergang des von äußeren Feldern ungestörten ^{133}Cs-Atoms. Die mit der Zäsiumuhr erreichte Genauigkeit ist besser als 10^{-12}, das entspricht einem Fehler von 0,3 s in 10^4 Jahren. In ähnlicher Weise arbeiten Atomuhren, bei denen die Hyperfeinstrukturaufspaltungen von Energieniveaus von ^{1}H-, ^{87}Rb- und ^{205}Tl-Atomen ausgenutzt werden. Mit Hilfe der Atomuhren ist es möglich, geringe Änderungen der Erdrotation festzustellen und weitere experimentelle Nachweise der Relativitätstheorie zu erbringen.

12.2. Bürotechnik

Der Einsatz der modernen technischen Mittel im Büro trägt wesentlich dazu bei, den manuellen

Aufwand für die Verwaltungsarbeit entscheidend zu senken, den Menschen von geistiger Routinearbeit spürbar zu entlasten sowie ausgewählte Informationen so aufbereitet und rechtzeitig bereitzustellen, daß sie sowohl langfristige Entscheidungen optimal vorbereiten helfen als auch den sofortigen Eingriff zur verbesserten Steuerung laufender Prozesse ermöglichen.
Mit der Entwicklung der Mikroelektronik (vgl. 11.5.4.) werden die eingesetzten Anlagen, Maschinen und Geräte so weiterentwickelt, daß teilweise auch bereits eine Automatisierung von Verwaltungsarbeiten möglich wird. Außerdem ergibt sich durch die verminderten Abmessungen, die geräuscharme Arbeitsweise, den erhöhten Bedienungskomfort bei zum Teil vermindertem finanziellem Aufwand ein erhöhter Gebrauchswert, der neben der Leistungssteigerung die Arbeitsbedingungen der Beschäftigten wesentlich verbessert. Ein charakteristisches Beispiel dafür sind die elektronischen Taschen- und Tischrechner, die das Bild in den Büros zunehmend bestimmen. So sind elektronische Tischrechner gegenüber den mechanischen Rechenmaschinen von geringerer Abmessung, arbeiten schneller und geräuscharm, bieten erweiterte Speicherkapazität, ermöglichen den Einsatz eines Streifendruckers und wahlweise die Gewinnung maschinenlesbarer Datenträger. Überwiegend verfügen sie über eine Programmsteuerung.

12.2.1. Einrichtungen zur Mechanisierung der Büroarbeit

Schreibmaschinen sind Geräte zur maschinellen Klarschrifterzeugung, die ein visuell gut und z. T. auch maschinenlesbares Schriftbild erzeugen, mit durchschnittlich 6 bis 8 Anschlägen je Sekunde eine höhere Schreibgeschwindigkeit gegenüber dem Schreiben von Hand aufweisen und neben dem Originalschriftstück das Anfertigen von bis zu 10 weiteren Exemplaren ermöglichen. Moderne Fabrikate können mit Geräten zur Erzeugung maschinenlesbarer Informationsträger, wie Loch- oder Magnetbänder, gekoppelt werden. Der Informationsinhalt wird in der vorgesehenen Reihenfolge durch manuelles Bedienen der Tasten in die Schreibmaschine eingegeben und mit Hilfe der erhabenen Typen des *Typenträgers* und eines Farbbands ausgedruckt. Die 44 bis 46 nach innen gewölbten und der Form der Fingerkuppe angepaßten Tasten zur Eingabe der Schriftzeichen sind griffgünstig angeordnet. Als Typenträger werden überwiegend Hebel (Abb. 12.2.1-1) verwendet, die 2 Schriftzeichen tragen und einer Taste zugeordnet sind. Bei *Universaltypenträgern* werden alle Zeichen auf

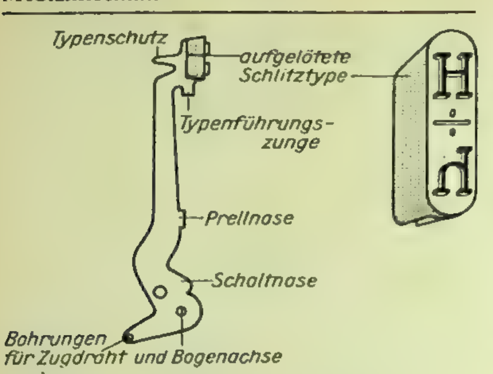


Abb. 12.2.1-1 Typenhebel und Schlitztype

einer geschlossenen Fläche untergebracht, z. B. einem kugelförmigen *Schreibkopf*, einer *Typenleiste* oder einer *Typenkette*.
Großschreibmaschinen, auch als Büro- oder Standardschreibmaschinen bezeichnet, haben eine Höhe von über 150 mm, 14 bis 18 kg Masse, große Stabilität, hohe Schreibgeschwindigkeit ermöglichende Bauart und umfassende Sonderausstattungen.
Kleinschreibmaschinen sind zwischen 90 bis 150 mm hoch, haben 5 bis 7 kg Masse ohne Koffer und verminderten Ausstattungsgrad.
Reiseschreibmaschinen (Flachschreibmaschinen) werden bis zu 90 mm hoch gebaut und sind bei 4 kg Masse (ohne Koffer) leicht transportabel.
Mechanische Schreibmaschinen. Der Druck der Typenträger auf den Druckträger wird nur durch Übertragung der manuellen Energie des Bedieners ausgelöst.
Typenhebelbewegung. Die Energie- und Bewegungsumformung erfolgt über das Typenhebelgetriebe (Abb. 12.2.1-2). Die Energie des Anschlags auf die Taste wird in Abdruckenergie der Type und die geradlinige Bewegung des Tastenwegs (16 bis 18 mm) in die Schwenkbewegung des Typenhebels umgesetzt.
Wagenbewegung. Der Wagen, in dem die gummibezogene Schreibwalze drehbar gelagert ist, mit meist 320, 380 oder 460 mm Schreibbreite, wird nach jedem Anschlag um eine Teilung (allgemein 2,6 mm breite Druckstelle) durch eine

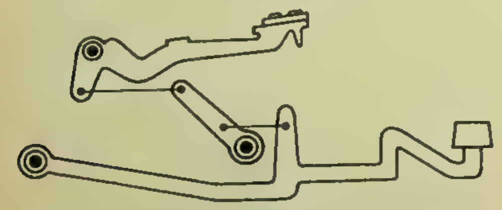


Abb. 12.2.1-2 Typenhebelgetriebe einer Büroschreibmaschine („Optima M 16")

beim manuell ausgeführten Wagenrücklauf gespannte Spiralfeder weiterbewegt. Die Steuerung übernimmt ein *Schrittschaltwerk.*
Zeilenschaltung. Der Zeilenschalthebel steuert die Zeilenschaltklinke, die in ein mit der Schreibwalze verbundenes Schaltrad eingreift und die Walze um den vorgegebenen Zeilenabstand weiterdreht.
Umschaltung. Für den Druck der oberen Typen eines Typenträgers, meist Großbuchstaben oder Sonderzeichen, wird die *Umschalttaste* betätigt. Dadurch wird das Typenhebelsegment gesenkt (*Segmentumschaltung*) oder der Wagen um 6,6 mm gehoben (*Wagenumschaltung*).
Farbbandbewegung. Das Farbband wird vor dem Druck in die Höhe des Aufschlags der Type angehoben und nach dem Druck wieder abgesenkt. Zur Regeneration der Druckfarbe für die mehrfache Nutzung von Textilfarbbändern ist ein Längsvorschub erforderlich. Einmalig zu verwendendes Kohle- (Karbon-) Band, ein dünn karbonbeschichtetes Plastband, erzeugt einen scharf konturierten und gleichmäßigen Abdruck.
Die Ausführung spezieller Schreibarbeiten erleichtern folgende mögliche Sonderausstattungen: *Tabulator* zum selbständigen Wagentransport von einem Tabellenfeld zur 1. Druckstelle des folgenden Feldes, *Dezimaltabulator* zur dezimalstellengerechten Wagenbewegung beim Schreiben mehrerer Zahlenkolonnen, *Sperrschriftschaltung* zur Verdopplung der Schriftteilung und damit zur optischen Hervorhebung wichtiger Teile eines Textes, *Randausgleich* zum Begradigen des rechten Randes bei der zweiten Niederschrift eines vorgeschriebenen Textes, *Proportionalschaltung* mit von der Buchstabenbreite abhängigen Schaltschritten und damit einem der natürlichen Buchstabenbreite entsprechenden, gefällig wirkenden Schriftbild, *Breitwagen* mit einem Papierdurchlaß bis zu 620 mm, *Vorsteckeinrichtung* zum zeilengerechten Einziehen in den Wagen von gleichzeitig zu bedruckenden Vordrucken, Konto- oder Karteikarten.
Elektromechanische Schreibmaschinen. Die bei mechanischen Schreibmaschinen mit manueller Energie ausgeführten Funktionen werden nur noch durch einen Tastenanschlag mit ≈ 5 mm Tastenweg ausgelöst. Die für die Ausführung der einzelnen Bewegungsabläufe notwendige Energie liefert eine von einem Elektromotor ständig angetriebene Welle (≈ 400 U/min). Die für den Tastenschlag aufgewendete Kraft wird durch eine Zahn- oder Reibwelle (Abb. 12.2.1-3) auf das Typenhebelgetriebe übertragen.
Schreibautomaten sind elektromechanische Schreibmaschinen zur Vervielfältigung von Schriftstücken in Originalform durch mehrfaches automatisches Schreiben. Gleichzeitig mit dem 1. Exemplar wird ein maschinenlesbarer Informationsträger, z. B. ein Loch- oder Magnetband, hergestellt, der in einem folgenden Arbeitsgang von einem Leser des Schreibauto-

maten gelesen wird und dessen gespeicherte Informationen alle sonst manuell ausgeführten Funktionen durchführt. Die Leistung beträgt max. 10 Anschläge/s. Durch die Verwendung von geeigneten Speichern zur Aufnahme konstanter Daten und von Steuereinrichtungen, wie Steuer-Lochbändern, Steuertastaturen und/oder Programmtafeln, ist eine variable automatische *Textverarbeitung* in den dann als *Organisationsautomaten* bezeichneten Maschinen möglich, die den manuellen Arbeitsaufwand weiter senken.

Diktiergeräte speichern den aufgesprochenen Text elektromagnetisch auf einem Trägermaterial und geben ihn auf Abruf wieder. Neben Magnetbändern werden auch *Folien*, *Platten* und *Stahlbänder* oder *-drähte* als Speichermittel genutzt. Reisediktiergeräte zeichnen sich durch besonders geringe Masse, geringe Abmessungen und Batteriebetrieb aus.

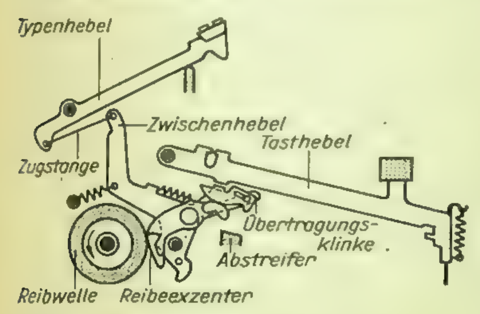


Abb. 12.2.1-3 Elektromechanischer Typenhebelantrieb mit Reibwelle („IBM")

Rechengeräte sind neben Rechentafeln, Rechentabellen oder Nomogrammen weitere nichtschreibende Hilfsmittel zur Erleichterung einfacher Rechenarbeiten. Dazu gehören *Addiergeräte* oder *Addiatoren*, die über durch Griffel entsprechend der zu addierenden oder subtrahierenden Zahlen zu bewegende Zahnstangen verfügen und das Ergebnis in einem Resultatfenster anzeigen. Weiterhin werden *Rechenbretter*, *-schieber*, *-stifte* und *-scheiben* verwendet. Derartige Geräte werden jedoch immer mehr durch elektronische Taschenrechner ersetzt.

Rechenmaschinen. Für die Ausführung von häufig wiederkehrenden Rechenoperationen am Arbeitsplatz werden *tastaturgesteuerte Tischrechenmaschinen* mit mechanischen oder elektronischen Rechenwerken und Speichern geringer Anzahl und Speicherkapazität dann eingesetzt, wenn Anzahl und Umfang der Rechenoperationen begrenzt sowie die Ergebnisse sofort benötigt werden. Mechanisch oder elektronisch arbeitende und speichernde Sonderausführungen für spezielle Verwaltungsarbeiten sind als Weiterentwicklungen die Fakturier-, Buchungs-, Abrechnungsmaschinen und Registrierkassen.

Mechanische Tischrechner sind *Ziffern-(Digital-) Rechenmaschinen*, die als *2-Spezies- (Arten-) Maschinen* addieren und subtrahieren, als

3-Spezies-Maschinen zusätzlich multiplizieren und als *4-Spezies-Maschinen* alle 4 Grundrechenarten ausführen.

Saldiermaschinen weisen bei Rechenoperationen mit Ergebnissen < 0 keine Komplement- (Ergänzungs-), sondern negative Absolutwerte aus, die rot ausgedruckt werden.

Grundsätzlich werden bei mechanischen Rechenmaschinen Multiplikation und Division durch wiederholtes Addieren oder Subtrahieren ausgeführt.

Halbautomaten sind mit elektrischem Antrieb und selbsttätiger Divison ausgerüstet, während sich ein *Vollautomat* durch den automatischen, mittels Funktionstasten gesteuerten Ablauf sämtlicher Rechenfunktionen auszeichnet. Die Eingabe der Operanden erfolgt über eine international standardisierte, blind zu bedienende Tastatur mit 10 Ziffern- und weiteren Funktionstasten, die sich gegenüber der Volltastatur mit 9 Zifferntasten je Dezimalstelle der größtmöglich einzugebenden Zahl durchsetzt. Die Verarbeitung der Operanden erfolgt mechanisch mit *Zahnstangen* oder *-segmenten*, *Proportionalhebel-Schaltwerken*, *Staffelwalzen*, *Schaltklinken* oder *Proportionalrädern*. Das Hauptzählwerk speichert Summen, Differenzen oder Produkte, Quotienten weist das Umdrehungszählwerk aus. Die Ergebnisse sind entweder von den Ziffernrollen der beiden Zählwerke ablesbar oder werden durch ein Druckwerk auf einen Papierstreifen einschließlich der Operanden und Sonderzeichen gedruckt.

Elektronische Tisch- und ***Taschenrechner*** sind ebenfalls Ziffern- (Digital-) Rechner und immer Vollautomaten (vgl. 14.3.). Durch den geringeren Materialaufwand, die leichter zu automatisierende Fertigung, die geringeren Abmessungen, die geringere Masse, die schnellere und geräuschlose Arbeitsweise, die bei Bedarf zu erweiternden Rechen- und Speichermöglichkeiten sowie die geringere Energieaufnahme und den niedrigeren Preis lösen sie die mechanischen Rechenmaschinen ab und erleichtern entscheidend die Verwaltungsarbeit. Der geringe Raumbedarf dieser Geräte wurde durch den Einsatz integrierter Schaltkreise (vgl. 11.5.4.) erreicht.

Registrierkassen dienen im Einzelhandel, in Gaststätten, Hotels, Banken usw. der Registrierung einzelner Vorgänge (Einzelbeträge, Posten) und der maschinellen Errechnung des sich daraus ergebenden, vom Kunden zu zahlenden Gesamtbetrags unter Beachtung eventueller Zuschläge oder Preisnachlässe. Die Einzelbeträge werden überwiegend noch manuell über eine Volltastatur eingegeben. Ergänzende konstante Angaben, wie Tagesdatum, Kennzeichen des Kassierers usw. lassen sich einmalig bei Beginn der Arbeit einstellen und werden bei Bedarf immer wieder ohne zusätzlichen manuellen Aufwand ausgege-

ben. Je Vorgang unterschiedliche ergänzende Angaben, wie Warengruppe, Zahlungsart sind dagegen manuell einzugeben und wegen des erforderlichen Aufwands auf ein unbedingt notwendiges Minimum zu beschränken. Künftig wird sich die Eingabe der benötigten Informationen durch das maschinelle Lesen von Etiketten verstärken. Diese Datenträger speichern die benötigten Angaben, wie Einzelpreis, Artikelnummer usw. durch gestanzte Löcher oder spezielle Markierungen auch maschinenlesbar.
Die Speicherung und Addition der eingegebenen Einzelbeträge erfolgt in einem *Addierwerk*. Ein Hauptaddierwerk speichert dabei alle eingegebenen Beträge. Die mechanisch arbeitenden Addierwerke werden zunehmend durch die leistungsfähigere Elektronik ersetzt, die geräuscharm arbeitet und eine größere Speicherkapazität ermöglicht.
Die Einzelbeträge und der errechnete Gesamtbetrag werden in einem für Kunden und Kassierer zur Kontrolle gut sichtbaren Anzeigewerk (*Indikator*) dargestellt. Außerdem drucken die meisten Registrierkassen alle Einzel- und Gesamtbeträge einschließlich der ergänzenden Angaben auf einen Papierstreifen, der zur späteren Überprüfung bis Arbeitsschluß in der Registrierkasse verbleibt. Der Kunde erhält einen Bon oder eine Quittung mit den für ihn zutreffenden Beträgen.
Die Geldbeträge können in Schubfächern aufbewahrt werden, die unter dem technischen Teil der Registrierkasse verschließbar angebracht sind und sich jeweils nach Errechnung eines Gesamtbetrags selbsttätig öffnen können. Der Anschluß von automatischen Geldrückgebern ist möglich.
Zunehmend erfolgt der Anschluß von Geräten zur gleichzeitigen Datenausgabe in maschinenlesbare Informationsträger, wie z. B. Loch- oder Magnetbänder, Magnetfolien, für eine folgende, umfassende Auswertung der Einzelinformationen in EDVA. Die Registrierkasse wird damit zu einem wichtigen Gerät der Datenerfassung für die EDV.
Buchungsmaschinen ermöglichen die Verarbeitung der von Belegen entnommenen und eingetasteten Daten, die Speicherung der errechneten Ergebnisse und den Druck von Einzeldaten und Ergebnissen auf Journale, vorgesteckte Konten o. a. Vordrucke. Die Dateneingabe erfolgt über Tastatur oder automatisch für die Vorträge und konstanten Daten bei vorhandenen Zusatzeinrichtungen, z. B. von einem Magnetstreifen am Kontorand. Die eingegebenen Daten werden mechanisch oder elektronisch meist in allen 4 Grundrechenarten in Rechenwerken nach Programmsteuerung und z. T. auch tastaturgesteuert verarbeitet und gespeichert. Die Datenausgabe erfolgt als Druck und bei Bedarf auf maschinenlesbaren Datenträgern, wie Loch- und Magnetband.
Fakturiermaschinen führen speziell Schreib- und Rechenfunktionen zum Ausfertigen von Rechnungen oder artverwandten Arbeiten aus. Durch elektronische Arbeitsweise, zusätzliche Speichermöglichkeiten, erweiterte Programmsteuerung und den Anschluß zum Lesen von und zum Speichern auf elektronischen Datenträgern wurden sie zu *Abrechnungsautomaten* weiterentwickelt.
Nachrichten- und Fördergeräte transportieren Informationen vom Ort ihrer Entstehung zu dem der Aufbereitung, Verarbeitung, Verwertung und Aufbewahrung. Dazu gehören z. B. die große Anzahl von verschiedenen Geräten der Nachrichtentechnik (vgl. 11.4.), Rohrpost- und Bandförderanlagen.
Postbearbeitungsmaschinen erleichtern die Bearbeitung eingehender Post durch Brieföffnungsmaschinen und der zu versendenden Post durch Brieffalt-, Kuvertier-, Briefschließ- und Frankiermaschinen, die untereinander gekoppelt und noch durch Adressiermaschinen ergänzt werden können.
Planungsgeräte erleichtern die Planung und Kontrolle von Einzel- und Gesamtprozessen durch übersichtliche Darstellung auf meist als Magnethaft-, Plan- oder Stecktafeln ausgeführten Geräten.

12.2.2. Lochkarten- und Lochbandtechnik

Lochkarten und Lochbänder sind maschinenlesbare Datenträger. Nach einem festgelegten Kode werden Ziffern, Buchstaben, Sonderzeichen und Befehle durch eine Lochschrift so gespeichert, daß sie von speziellen Lesegeräten mit hoher Geschwindigkeit maschinell erkannt und in Datenverarbeitungsanlagen eingegeben werden können. Es kann sich dabei sowohl um EDVA mittlerer bis großer Leistungsfähigkeit als auch um elektronische Kleinrechner oder Anlagen der mittleren Datentechnik handeln (vgl. 14.3.). Dagegen ist die früher häufige Verwendung von Lochkarten und Lochbändern in weitgehend eigenständigen Verfahren im Bereich der sog. mittleren und höheren Mechanisierung mit meist mechanischen oder elektromechanischen Lese- und Auswertungsgeräten heute kaum noch üblich.
Lochkartentechnik. *Lochkarten* speichern Daten durch gestanzte Löcher meist rechteckiger Form in den Abmessungen 1,4 mm × 3,19 mm, früher auch in runder Form mit einem Durchmesser von 1,88 mm. Als Material wird Karton von 0,17 mm Dicke in den genormten Abmessungen von 187,33 mm × 82,55 mm verwendet. Dieser Karton muß aufgrund der hohen Anforderungen bei der Zuführung der Lochkarten zu den mit großer Geschwindigkeit arbeitenden Leseeinrichtungen u. a. folgende Eigenschaften aufweisen: sati-

niert, holzfrei, etwas griffig, biegsam, elektrisch isolierend sowie unempfindlich gegen Temperaturschwankungen im Bereich von 17 bis 23 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von 50 bis 60 %.
Jede Lochkarte enthält in 80 Spalten für jede Ziffer eine mögliche Lochstelle in aufsteigender Reihenfolge, von oben nach unten jeweils für die Ziffern 0 bis 9. Entsprechend der zu speichernden Ziffer wird ein Loch in der entsprechenden Lochzeile gestanzt. Eine mechanische, elektromechanische oder fotoelektronische Leseeinrichtung kann das gestanzte Loch lesen, den zugeordneten Ziffernwert aufgrund des Abstands des Loches von den Kartenrändern maschinell erkennen und zur Durchführung von Rechenoperationen, zum Ordnen und weiteren Speichern in das auswertende Gerät oder die Anlage eingeben.
Die 10 Lochzeilen zur Ziffernspeicherung werden am oberen Kartenrand über der Lochzeile 0 durch 2 Überlochzeilen „11" und „12" ergänzt. Sie nehmen die Löcher zur Bildung von Lochkombinationen für die im Bedarfsfall notwendige Speicherung von Buchstaben und Sonderzeichen entsprechend einer festgelegten Zuordnung (Kodierung) auf.
Je nach Art der zu speichernden Informationen lassen sich nebeneinanderliegende Lochspalten zu Lochfeldern für die Speicherung einer Zahl oder eines Wortes zusammenfassen.
Ziffernkarten tragen in jeder möglichen Lochstelle den Aufdruck der zugeordneten Ziffernwerte der Lochzeilen 0 bis 9 und die fortlaufenden Nummern der Spalten 1 bis 80.
Vordruck- oder *Normal-Lochkarten* weisen zusätzlich die Bezeichnung und z. T. die Begrenzungslinien der Lochfelder auf.
Verbundlochkarten vereinen materialsparend die Funktion eines Belegs und einer Lochkarte: sie nehmen sowohl gedruckte, handschriftliche und auch die entsprechenden, für die Auswertung erforderlichen Informationen in Lochschrift auf. *Handlochkarten* weichen im Format und durch die nur mechanisierte Auswertung von den vorgenannten auch als *Maschinenlochkarten* bezeichneten Kartenarten ab, speichern die Informationen nach dem gleichen Prinzip, aber in einer anderen Kodierung.
Lochkartenmaschinen. Zu ihnen zählen Lochkartenstanzer, -prüfer und Sortiermaschinen. Lochkartenmischer, Tabelliermaschinen, Summen- und Rechenstanzer sind inzwischen weitgehend von den leistungsfähigeren EDVA (vgl. 14.3.) mit peripheren Lochkartenein- und -ausgabeeinheiten abgelöst worden.
Lochkartenstanzer, auch als *Locher* bezeichnet, stanzen die meist manuell über eine Tastatur eingegebenen numerischen und auch alphanumerischen, auszuwertenden Daten einschließlich ergänzender Ordnungs-, Hinweis- und Steuerdaten in die automatisch zugeführten Lochkarten. Dazu dienen bei dem spaltenweise arbeitenden *Motorschrittstanzer* 12 übereinander geordnete

Stanzstempel. Jedes Zeichen wird sofort nach Bedienung der betreffenden Taste entsprechend des festgelegten Kode mit einem oder mehreren Löchern in einer Spalte gespeichert. Bei *Motorblockstanzern* werden zunächst alle je Lochkarte zu speichernden Daten eingegeben und in einem Stanzblock gespeichert, der für jede mögliche Lochstelle einer Lochkarte einen Stanzstempel enthält. Vor dem Auslösen des Stanzvorgangs ist noch eine visuelle Kontrolle der richtigen Eingabe und die Korrektur der als falsch erkannten Daten möglich. Beide Arten von Lochkartenstanzern erlauben auch das maschinelle Übertragen von für mehrere Lochkarten konstante Daten aus der zuvor gestanzten Lochkarte, aus einer speziellen Lochkarte (*Matrizenlochkarte*), aus mechanischen oder elektronischen Speichern. *Verbundlochkarten* ermöglichen das maschinelle Stanzen aller vorgegebenen Daten und vermindern damit den manuellen Arbeitsaufwand.
Lochkartenprüfer. Die in die Lochkarte gestanzten Angaben müssen vor ihrer Auswertung in einem gesonderten, zusätzlichen Arbeitsgang geprüft werden, um die erforderliche Genauigkeit der Ergebnisse der folgenden elektronischen Datenverarbeitung zu sichern. Der Lochkartenprüfer gleicht in seinem Aufbau dem Lochkartenstanzer, verfügt jedoch statt der Stanzeinheit über eine Leseeinheit. Die nochmals von demselben Beleg eingegebenen Daten werden elektrisch über Bürsten oder fotoelektrisch mit den gestanzten Löchern verglichen. Bei einem ermittelten Fehler stoppt der Prüfer den Ablauf.
Sortiermaschine. Nach der Prüfung werden die Lochkarten in die erforderliche Reihenfolge gebracht. Sie werden je Arbeitsgang nach je einem enthaltenen Loch in einer Spalte und damit nach je einer Stelle des betreffenden Ordnungsbegriffs geordnet und in die 13 bis 14 vorhandenen Sortierfächer, einschließlich einem Restfach, abgelegt, aus denen sie vom Bediener der Sortiermaschine in auf- oder absteigender Reihenfolge entnommen und zur Sortierung der folgenden Spalte erneut in den Zufuhrschacht der Sortiermaschine eingelegt werden. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zur Sortierung der letzten Spalte des Ordnungsbegriffs. Die früher sich je Auswertung eines Lochkartenstapels wiederholenden Sortiervorgänge werden heute von den leistungsfähigeren EDVA übernommen.
Lochbandtechnik. Das Lochband besteht aus 0,085 bis 0,1 mm dickem, pergamentartigem Papier in einer Breite von 17,5 bis 25,4 mm (1 Zoll) und einer Länge bis zu 300 m. Das verwendete Papier muß dabei reißfest, knitterfest, flexibel, elektrisch isolierend und gegen klimatische Einflüsse weitgehend unempfindlich sein. Zur Spei-

cherung der Informationen in Lochschrift durch runde Löcher mit einem Durchmesser von 1,8 mm dienen 5 bis 8 Informations-Lochspuren (*Kanäle*), von denen z. B. beim 8-Spur-Band eine Kodespur der Aufnahme eines Prüflochs für Kontrollzwecke dient. Zur Führung des Bands in der Leseeinrichtung dienen runde Transportlöcher von 1,2 mm Durchmesser, die in einer zusätzlichen Spur zwischen der 2. und 3. Informationsspur bei dem 5spurigen oder zwischen der 3. und 4. Spur bei dem 8spurigen Band angeordnet sind.

Die Speicherung der Informationen erfolgt nach einem vereinbarten Kode. Da nur 5 bis 7 Informationsspuren verfügbar sind, ist im Gegensatz zur Lochkarte in jedem Fall eine Kodierung auch für die zu speichernden Ziffern notwendig. Die Speicherkapazität beträgt dabei in einer Zeile der nebeneinanderliegenden Lochstellen aller Informationsspuren beim 5-Spur-Band $2^5 - 1$ Lochkombinationen $= 32 - 1 = 31$ und beim 8-Spur-Band $2^8 - 1$ Lochkombinationen $= 256 - 1 = 255$ unterschiedliche Zeichen.

Die Reduzierung um eine Kombination ist erforderlich, da die Variante „keine Lochung" praktisch nicht nutzbar ist. Die Speicherkapazität des 5-Spur-Bands kann dadurch erhöht werden, daß jeder Lochkombination 2 Bedeutungen zugeordnet werden. Vorgesetzte gestanzte Zeichen geben beim Lesen an, aus welcher Gruppe von Bedeutungen (Ziffern und Sonderzeichen oder Buchstaben) die folgende Lochkombination zu dekodieren ist. Diese Möglichkeit wird z. B. bei dem Internationalen Telegrafenalphabet Nr. 2 des CCITT 1932 genutzt.

Die Speicherkapazität je Lochband ist von der Bandlänge abhängig: 25,4 mm (1 Zoll) Bandlänge nimmt 10 Lochzeilen und damit 10 Lochkombinationen auf, die 10 zu speichernden Zeichen entsprechen. Ein Band von 300 m Länge enthält damit unter Beachtung von aus technischen Gründen z. T. nicht zur Informationsspeicherung genutzten Bandteilen $\approx 10^5$ bis $1,2 \cdot 10^5$ Zeichen. Eine Lochkarte speichert dagegen nur max. 80 Zeichen. Zur Speicherung der gleichen Zeichenmenge des Lochbands ist daher eine große Anzahl Lochkarten erforderlich. Damit besitzt das Lochband gegenüber der Lochkarte hinsichtlich der Eingabe in EDVA als maschinenlesbarer Datenträger Vorteile, da die Zuführung in die Leseeinrichtung technisch wesentlich leichter, sicherer und damit schneller zu realisieren ist. So beträgt die Geschwindigkeit schneller Lochbandleser bis zu 2000 Zeichen/s.

Lochbänder dienen — außer der vorrangigen Nutzung als wichtiges Speichermedium — der Datenbereitstellung für die EDV, der Steuerung und z. T. der Dateneingabe in Schreibautomaten, Buchungs- und Fakturiermaschinen, Fernschreiber, Fertigungs- und Verarbeitungsmaschinen, wie Werkzeug- (vgl. 8.9.2.), Setzautomaten (vgl. 17.1.3.) u. a.

Lochbandgeräte. Die Eingabe der zu speichernden Daten erfolgt allgemein über die Tastatur einer Büromaschine, wie Schreib-, Buchungs- oder Fakturiermaschine, die mit einem *Lochbandstanzer* gekoppelt ist. Die eingegebenen Daten werden parallel zu dem Arbeitsablauf der Büromaschine (Rechnen, Drucken) in einer speziellen Baugruppe kodiert und zusammen mit den Transportlöchern in das Lochband gestanzt. Die Arbeitsleistung derartiger Lochbandstanzer ist der Eingabegeschwindigkeit angepaßt und beträgt 10 bis 12 Zeichen/s, beim Einsatz als Ausgabegerät elektronischer Rechner liegt diese Leistung wesentlich höher (vgl. 14.3.).

Lochbandleser arbeiten mit Lesegeschwindigkeiten bis zu 50 Zeichen/s, z. B. für die Dateneingabe in Büromaschinen oder zur Steuerung anderer Maschinen mit Abfühlstiften oder -bürsten. Schnell-Lochbandleser zur Dateneingabe in EDVA tasten die enthaltenen Löcher kapazitiv oder fotoelektrisch ab. Die bei einem Loch eintretende Strom- oder Spannungsänderung wird nach ihrer Verstärkung dekodiert und löst die weitere Verarbeitung der Daten aus.

12.3. Optische und feinmechanisch-optische Geräte

12.3.1. Grundlagen der Strahlenoptik

Die Strahlenoptik oder geometrische Optik befaßt sich mit der Ausbreitung des Lichts in optischen Instrumenten. Die Ausdehnung der meisten optischen Instrumente ist gegenüber der Wellenlänge des Lichts so groß, daß normalerweise Beugungs- und Interferenzeffekte nicht auftreten. Ein Wellenzug oder eine Folge von Lichtwellen breitet sich geradlinig aus. Diese Linien kennzeichnen die Ausbreitungsrichtung des Lichts und werden als Lichtstrahlen bezeichnet. Die Lichtenergie pflanzt sich längs der Bahn der Lichtstrahlen fort. Die Lichtstrahlen unterliegen dem Reflexions- und Brechungsgesetz. Dabei gilt der Satz von der Umkehrbarkeit des Lichtwegs. Auf der Grundlage dieser beiden Gesetze kann man unter Benutzung der üblichen Grundregeln der Euklidischen Geometrie einen mathematischen Formalismus aufbauen, der ein eigenes Teilgebiet bildet und als *geometrische Optik* bezeichnet wird. Für genauere Betrachtungen optischer Geräte genügt es aber nicht, das Licht als Strahl aufzufassen, vielmehr muß sein Wellencharakter berücksichtigt werden. Die auftretenden Beugungserscheinungen untersucht die Wellenoptik (vgl. 12.3.2.). Der in der geometrischen Optik gezeichnete Strahlengang gilt bei auftretender Brechung streng nur für eine Wellenlänge bzw. Farbe.

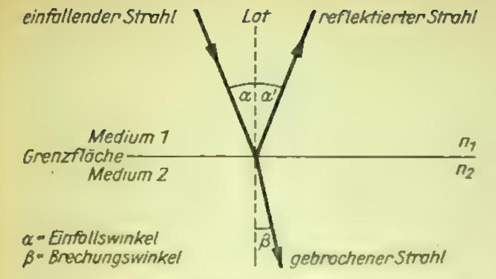


Abb. 12.3.1-1 Zum Reflexions- und Brechungsgesetz

Reflexions- und Brechungsgesetz. Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier verschiedener Medien, so wird ein Teil von ihm zurückgeworfen und der andere Teil in das zweite Medium hinein gebrochen. In isotropen Medien liegen einfallender, reflektierter und gebrochener Strahl in einer Ebene (Abb. 12.3.1-1). Wenn Einfallswinkel α und Reflexionswinkel α' vom Einfallslot aus gezählt werden, so gilt das *Reflexionsgesetz* $\alpha = -\alpha'$. Die Brechung eines Lichtstrahls beim Übergang von einem Medium zum anderen erfolgt, weil sich das Licht in einem optisch dichteren Stoff langsamer als in einem optisch dünneren Stoff ausbreitet. Einfallender und gebrochener Strahl unterliegen dem *Snelliusschen Brechungsgesetz* und stehen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 im ersten und c_2 im zweiten Medium in dem Zusammenhang

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

wobei n_{21} die *Brechzahl*, auch Brechungszahl, -index, -exponent oder -vermögen genannt, des zweiten Mediums gegen das erste ist und n_2 bzw. n_1 die Brechzahl des zweiten bzw. ersten Mediums gegenüber Luft ist. Die auf das Vakuum bezogene Brechzahl n_0 wird als *absolute Brechzahl* $n_0 = \frac{c_0}{c}$ bezeichnet. $c_0 = 2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s ist dabei die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Vakuum und c die im Medium. Wenn n_L die Brechzahl der Luft gegen das Vakuum und n die des Mediums gegen Luft ist, so gilt $n_0 = n \cdot n_L$.

Tritt ein Lichtstrahl von einem optisch dichteren Medium (z. B. Glas) mit der Brechzahl n_1 in ein optisch dünneres Medium (z. B. Luft) mit der Brechzahl n_2 ($n_1 > n_2$) über, so wird für einen unter einem bestimmten Winkel α einfallenden Strahl der Brechungswinkel $\beta = 90°$. Wird der Einfallswinkel größer, kann der Strahl das dichtere Medium nicht mehr verlassen. Diese *Totalreflexion* tritt für alle Winkel größer als der Grenzwinkel α_g ein, dabei gilt

$$\sin\alpha_g = \frac{n_2}{n_1}.$$

Die Brechzahl eines Stoffs (Tab. 12.3.1-2) hängt auch von der Wellenlänge des Lichts ab. Im Normalfall wächst die Brechzahl mit abnehmender Wellenlänge (normale Dispersion). Es gibt aber auch den umgekehrten Fall und Bereiche, in denen Unstetigkeiten auftreten (anomale Dispersion).

Reflexion am ebenen Spiegel. Ein von einer punktförmigen Lichtquelle L ausgehendes Strahlenbündel wird als homozentrisches Bündel bezeichnet. Nach der Reflexion am ebenen Spiegel verlaufen die Strahlen eines homozentrischen Bündels so, als würden sie von einer Lichtquelle L' hinter dem Spiegel ausgehen, die vom Spiegel den gleichen Abstand a wie L hat (Abb. 12.3.1-3).

Ein Beobachter sieht das virtuelle Bild der Lichtquelle in L'. Ohne zusätzliche Hilfsmittel kann nicht entschieden werden, ob die Strahlen von L oder L' ausgehen.

Konstruiert man auf diese Weise das Bild eines ausgedehnten Körpers, so zeigt sich, daß es seitenverkehrt ist; ein Rechtssystem wird zum Linkssystem, die rechte Hand erscheint als linke Hand usw.

Hohlspiegel, auch Konkav-, Sammel- oder Vergrößerungsspiegel genannt, haben eine nach innen gewölbte Oberfläche in Form einer Kugelschale (sphärischer Hohlspiegel) mit dem Krümmungsmittelpunkt M oder die Form eines Rotationsparaboloids. Die Mitte des Spiegels S wird als Scheitel und $\overline{MS}$ als Hauptachse bezeichnet. Fällt ein Bündel achsennaher paralleler Strahlen parallel zur Hauptachse ein, so wird jeder Strahl

Tab. 12.3.1-2 *Brechzahlen einiger Stoffe bei 20 °C für λ = 589 nm der Natrium D-Linie*

Stoff	Brechzahl	Stoff	Brechzahl
Luft von 101,3 kPa	1,000272	Diamant	2,417
Wasser	1,333	Bor- und Kronglas (leicht)	1,516
Alkohol	1,362	Flintglas (leicht)	1,613
Benzol	1,501		
Schwefelkohlenstoff	1,628	Flintglas (schwer)	1,752
Flußspat	1,434	Kanada-Balsam (lange erhitzt)	1,542
Steinsalz	1,544		

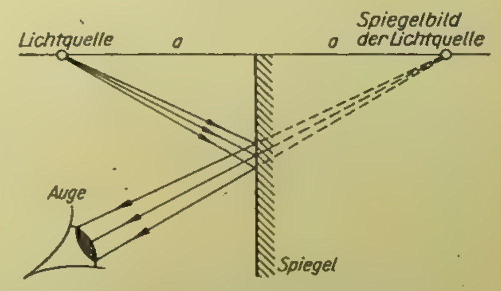


Abb. 12.3.1-3 Entstehung eines virtuellen Bildes am ebenen Spiegel

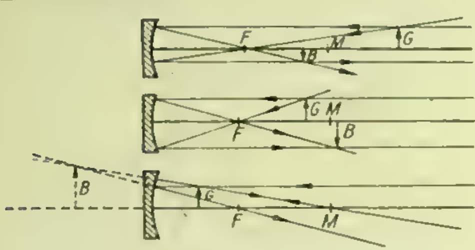


Abb. 12.3.1-4 Entstehung des Bildes am Hohlspiegel (G = Gegenstand, B = Bild)

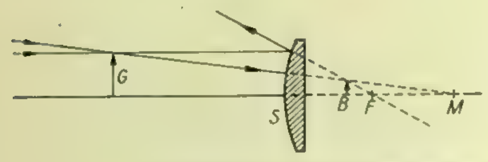


Abb. 12.3.1-5 Bildentstehung am Konvexspiegel

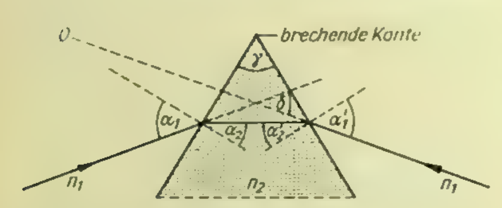


Abb. 12.3.1-6 Ablenkung eines Lichtstrahls durch ein Prisma ($n_2 > n_1$)

durch den Brennpunkt oder Fokus F reflektiert. Umgekehrt verlassen alle von F ausgehenden Strahlen den Hohlspiegel als paralleles Strahlenbündel. Hauptachsenstrahlen werden in sich selbst reflektiert. Aus Abb. 12.3.1-4 kann man entnehmen, wie auf grafische Weise das Spiegelbild eines Gegenstands konstruiert werden kann. Bezeichnet man mit a den Abstand des Gegenstands, mit a' den seines Bilds vom Hohlspiegel und mit $f = \overline{SF}$ die Brennweite, so hängen diese Größen entsprechend der Abbildungsgleichung $1/f = 1/a + 1/a'$ voneinander ab.

Konkavspiegel werden in der Astronomie in Spiegelteleskopen verwendet (vgl. 12.3.3.). Mit einem Hohlspiegel von 2 500 m^2 Fläche hat man durch Bündelung der Sonnenstrahlen schon Brennpunktstemperaturen bis zu 3 800 °C erreicht. Die Strahlen einer im Brennpunkt angebrachten Lichtquelle verlassen den Hohlspiegel parallel zur Achse. Die Spiegel von Scheinwerfern sind meist parabolisch gekrümmt.

Erhabene Spiegel, auch Konvex- oder Verkleinerungspiegel genannt, haben eine nach außen gewölbte meist kugelschalenförmige Oberfläche. Analog zum Hohlspiegel gelten für sie entsprechende Definitionen von Scheitel, Krümmungsmittelpunkt und Brennpunkt. Die Bildkonstruktion erfolgt ebenfalls in Analogie zum Hohlspiegel (Abb. 12.3.1-5). Der Brennpunkt wird von den Strahlen nie erreicht und als virtueller Brennpunkt bezeichnet und die Brennweite f negativ gewertet. In der Abbildungsgleichung $1/f = 1/a + 1/a'$ ist außer f auch noch a' negativ, da Bild und Gegenstand auf verschiedenen Seiten des Spiegels liegen. Konvexspiegel entwerfen vom Gegenstand stets ein aufrechtes, verkleinertes, virtuelles Bild. Rückspiegel in Autos sind Konvexspiegel.

Prisma. Das optische Prisma ist ein Körper aus einem durchsichtigen Stoff (z. B. Glas, Quarz, Kochsalz), der von mindestens 2 ebenen geschliffenen und polierten Flächen begrenzt wird, die sich in der brechenden Kante unter dem brechenden Winkel γ schneiden. Ein das Prisma durchsetzender Lichtstrahl wird, aus seiner ursprünglichen Richtung von der brechenden Kante weg, nach dem dickeren Ende hin gebrochen (Abb. 12.3.1-6). Die Gesamtablenkung des Lichtstrahls erfolgt um den Winkel $\delta = (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha'_1 - \alpha'_2) = \alpha_1 + \alpha_1 - \gamma$.

Das Objekt wird vom Beobachter in O' gesehen. Entsprechend der Anwendung und Wirkungsweise von Prismen unterscheidet man zwischen dem Dispersionsprisma zur spektralen Zerlegung des Lichts, dem Ablenkprisma, bei dem durch die Brechung eine (kleine) Änderung der Abbildungsrichtung erzeugt wird, dem Reflexionsprisma, das in seiner Wirkung einem ebenen Spiegel entspricht und zur stärkeren Ablenkung oder Bildumkehr dient, und dem Polarisationsprisma.

Sind die beiden Grenzflächen eines Prismas parallel und $\gamma = 0$, so erhält man eine planparallele Platte. Bei schrägem Auftreffen auf sie wird ein Lichtstrahl beim Durchgang parallel verschoben, während er bei senkrechtem Auftreffen ungebrochen bleibt.

Linsen sind lichtdurchlässige Körper, die durch Brechung des Lichts eine optische Abbildung vermitteln. In den meisten Fällen sind sie durch 2 Kugelschalen mit gleichen oder verschiedenen Radien begrenzt (sphärische Linsen, Abb. 12.3.1-7). Linsen bestehen aus speziellen Gläsern, Quarz, Flußspat u. a. durchsichtigen Stoffen. Als optische Achse oder Linsenachse wird die Verbindungsgerade der Krümmungsmittelpunkte der beiden Kugelschalen bezeichnet. Im Unterschied zu den gewölbten Spiegeln haben Linsen 2 Brennpunkte. Je nach der Art der Wölbung unterscheidet man bei den sphärischen Linsen zwischen Konvexlinsen, auch als Sammel- oder Positivlinsen bezeichnet, bei denen die Randdicke kleiner als die Mittendicke ist, und Konkavlinsen, auch als Zerstreuungs- oder Negativlinsen bezeichnet, bei denen die Randdicke größer als die Mittendicke ist. Der Strahlengang durch eine Linse ist der gleiche wie durch ein Prisma, das durch die Tangentenebenen in den Durchtrittspunkten des Lichtstrahls gebildet

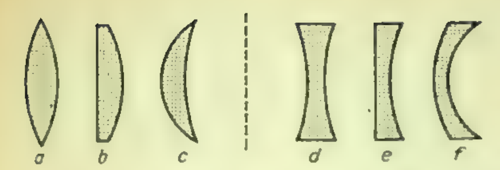


*Abb. 12.3.1-7 Formen sphärischer Linsen. Sammellinsen: **a** bikonvex, **b** plankonvex, **c** konkav konvex; Zerstreuungslinsen: **d** bikonkav, **e** plankonkav, **f** konvex konkav*

wird. Infolge der Krümmung der Linsenoberfläche ist die Neigung der Grenzflächen dieses Prismas kontinuierlich veränderlich. Jeder die Linse durchsetzende Lichtstrahl erleidet einen doppelten Knick. Zur Bildkonstruktion kann man mit einem einzigen Knick auskommen, wenn dieser an der Hauptebene erfolgt. Besonders einfach ist die Abbildung durch dünne Linsen; das sind Linsen, deren Dicke klein gegenüber dem Krümmungsradius der Begrenzungsflächen ist. Bei diesen fallen Mittelebene und Hauptebene zusammen. Für konvexe Linsen gelten die Hohlspiegelgesetze, für konkave die Gesetze für den erhabenen Spiegel. Insbesondere gilt für alle Linsen die Abbildungsgleichung $1/a + 1/a' = 1/f$. Dabei ist die Gegenstandsweite a immer positiv, die Brennweite f für Sammellinsen positiv und für Zerstreuungslinsen negativ und die Bildweite a' positiv für Sammellinsen, wenn ein reelles Bild entsteht, dagegen aber negativ beim Entwurf virtueller Bilder. Zerstreuungslinsen entwerfen immer virtuelle Bilder, Sammellinsen können sowohl reelle als auch virtuelle Bilder (Lupe) entwerfen (Abb. 12.3.1-8).

12.3.2. Grundlagen der Wellenoptik

Interferenz-, Beugungs- und Polarisationserscheinungen des Lichts können mit Hilfe von wellenoptischen Vorstellungen erklärt werden. Interferenzerscheinungen treten nur bei kohärentem Licht, das sind Lichtwellen, deren Frequenz und Phase übereinstimmen, auf. Das Licht wird in Form von Wellenzügen endlicher Länge von einzelnen, voneinander unabhängigen Atomen ausgestrahlt. 2 verschiedene Lichtquellen können deshalb niemals kohärente Wellenzüge ausstrahlen. Das Licht von Glühlampen, Leuchtstoffröhren und Quecksilberhochdrucklampen u. a. ist inkohärent, das von Lasern kohärent.

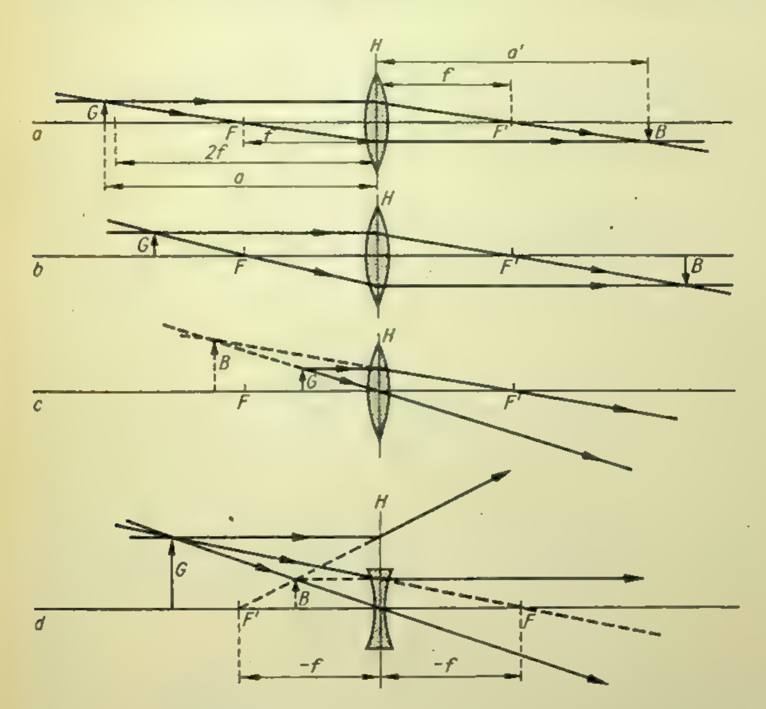


*Abb. 12.3.1-8 Abbildung durch dünne Linsen. **a** Sammellinse: Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite, das Bild ist reell, umgekehrt, verkleinert; **b** Sammellinse: Gegenstand zwischen einfacher und doppelter Brennweite, das Bild ist reell, umgekehrt, vergrößert; **c** Sammellinse: Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite, das Bild ist virtuell, aufrecht, vergrößert; **d** Zerstreuungslinse: für alle Lagen des Gegenstands entsteht ein virtuelles, aufrechtes, verkleinertes Bild*

Interferenz des Lichts tritt auf, wenn sich 2 Lichtwellen mit gleicher Schwingungszahl in einem Raumpunkt überlagern. Interferenz kann beobachtet werden, indem man das Licht eines Lasers oder einer Lichtquelle z. B. mit Hilfe von Spiegeln aufspaltet und die aufgespaltenen Wellenzüge überlagert. Bei Phasengleichheit verstärken diese sich, bei einer Phasendifferenz von 180° (π) tritt Auslöschung ein. Interferenz tritt z. B. auch an planparallelen Platten oder keilförmigen Schichten auf (Abb. 12.3.2-1).
Bei der Reflexion am optisch dichteren Medium tritt ein Phasensprung um π auf, der zum Gangunterschied der an den beiden Grenzflächen reflektierten Strahlen addiert wird. Beträgt der Gangunterschied einschließlich Phasensprung ($\lambda/2$) ein geradzahliges Vielfaches von $\lambda/2$, tritt Verstärkung ein, für ein ungeradzahliges Vielfaches von $\lambda/2$ Auslöschung. Bei Verwendung von weißem Licht tritt Auslöschung bei einer

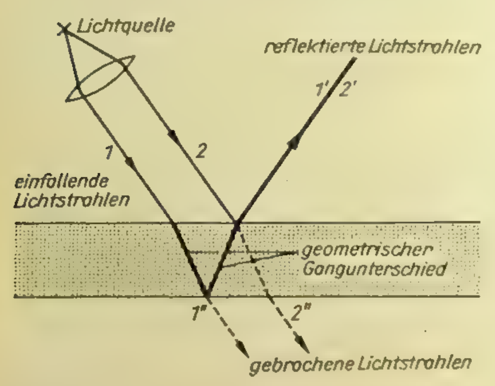


Abb. 12.3.2-1 Interferenz an einer planparallelen Platte

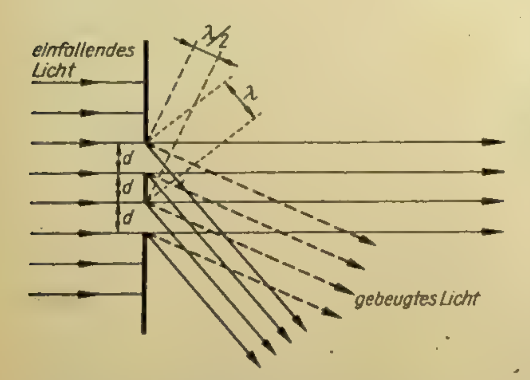


Abb. 12.3.2-2 Schema der Beugung am Doppelspalt. Der Gangunterschied der beiden gebeugten Lichtbündel beträgt im Beispiel $\lambda/2$ bzw. λ (d = Spaltbreite)

bestimmten Dicke der Platte immer nur für eine Farbe ein. Deshalb erscheinen dünne Blättchen, z. B. Seifenblasen, Ölschichten auf Wasser, Luftschichten in Sprüngen von Glas usw., immer farbig. Bei keilförmigen Schichten wechseln helle Streifen und dunkle (schwarze) Streifen einander ab. Bei Verwendung von weißem Licht erscheinen auch hier farbige Streifen, die sich abwechseln, z. B. die sog. Newtonschen Ringe.
Beugung des Lichts ist jede nicht durch Brechung oder Reflexion bedingte Abweichung des Lichts von der geradlinigen Ausbreitungsrichtung. Beugungserscheinungen treten z. B. am Spalt, Doppelspalt und Gitter, aber auch an kleinen kreisförmigen Lochblenden und Schirmen auf. Trifft eine ebene Lichtwelle auf einen undurchsichtigen Körper, in dem sich z. B. 2 Öffnungen (Doppelspalt, Abb. 12.3.2-2) befinden, so gehen von den beiden Öffnungen entsprechend dem Huygensschen Prinzip wieder Kugelwellen aus, die miteinander interferieren. Je nach dem Gangunterschied tritt Auslöschung (ungeradzahliges Vielfaches von $\lambda/2$) oder Verstärkung (geradzahliges Vielfaches von $\lambda/2$) ein. Für die Anwendung von Bedeutung ist vor allem die Beugung am Gitter. Dieses besteht aus einer großen Anzahl paralleler Spalte, die auf einer planparallelen Glasplatte entstehen, wenn diese mit parallelen Strichen geritzt wird. Es gibt Gitter mit bis zu 8000 Strichen/mm. Je größer die Anzahl der Striche pro Längeneinheit ist, um so höher ist das Auflösungsvermögen eines Gitters.
Polarisation des Lichts. Licht ist eine transversale elektromagnetische Welle, die in einer beliebigen Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen kann. Wir unterscheiden zwischen linear und elliptisch bzw. zirkular polarisiertem Licht. Bei letzterem läuft die Spitze des elektrischen Feldvektors auf einer Ellipse bzw. einem Kreis um. In natürlichem Licht wird keine Schwingungsebene bevorzugt, da es aus voneinander unabhängigen ungeordneten Wellenzügen besteht. Polarisiertes Licht kann aus natürlichem Licht mit Hilfe von *Polarisatoren* erzeugt werden. Als Polarisatoren dienen heute meist sog. Polarisationsfilter, das sind Folien, in die submikroskopische dichroitische Kristalle geordnet eingelagert sind. Physikalisch von besonderem Interesse ist die Erzeugung von polarisiertem Licht mit Hilfe von doppelt brechenden Kristallen sowie durch Reflexion und Brechung. Doppelbrechung tritt in optisch anisotropen Medien (bestimmten Kristallen) auf. Unter bestimmten Voraussetzungen wird in einem solchen Stoff ein Lichtstrahl in einen ordentlichen (unterliegt dem Snelliusschen Brechungsgesetz) und einen außerordentlichen (unterliegt ihm nicht) Lichtstrahl aufgespalten, die beide linear polarisiert sind. Polarisiertes Licht außerhalb des Kristalls erhält man, wenn einer der beiden Strahlen entfernt wird, das geschieht z. B. beim Nicolschen Prisma.

Aufbau optischer und feinmechanischer Geräte. Diese Geräte des wissenschaftlichen Gerätebaus gehören in den Bereich der informationsorientierten Technik und dienen zur Erfassung, Übertragung und Darstellung von Informationen. In den feinmechanisch-optischen Geräten werden in zunehmendem Maße auch elektromechanische, elektronische und optoelektronische Bauelemente bzw. Funktionsgruppen angewendet. Dies gilt vor allem für Strahlungs- bzw. Lichtquellen und für lichtelektrische Strahlungsempfänger, die dem Strahlungsnachweis, der Registrierung der Meßergebnisse und auch der Steuerung der Geräte dienen.
Als *optische Bauelemente* gelten in erster Linie Linsen, Prismen und Spiegel, an die außerordentlich hohe Anforderungen in bezug auf Sauberkeit und Reinheit des Materials (keine Schlieren, Blaseneinschlüsse und Kratzer) sowie Genauigkeit der Oberflächengestalt gestellt werden. Abweichungen von der vorgeschriebenen Oberflächengestalt bewirken hier, das gilt in besonderem Maße für Spiegel, entsprechende fehlerhafte Ablenkungen der Lichtstrahlen. Die optischen Bauelemente werden i. allg. durch Einbau in einer gemeinsamen Fassung als Baugruppe zusammengefaßt.
Optische Geräte sind Anordnungen aus optischen Elementen, mit denen auf optischem Wege eine Abbildung erzeugt wird, die mittelbar oder unmittelbar dem menschlichen Auge dargeboten wird. Dabei wird i. allg. die Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges erweitert. Aus diesem Grunde sind im Zusammenhang mit den optischen Geräten bestimmte *Funktionen des menschlichen Auges* zu beachten.
Die *Augenpupille* (Öffnungsblende des Auges) gestattet eine Anpassung an die Helligkeit der Umwelt, indem sich ihr Durchmesser zwischen 2 bis 8 mm einstellt (Adaptation). Bei optischen Geräten zur visuellen Beobachtung sollte die Austrittspupille des Gerätes nicht kleiner als die Augenpupille sein und mit letzterer räumlich zusammenfallen, um Helligkeitsverminderungen und Gesichtsfeldbeschränkungen zu vermeiden. Die Sehempfindung weist eine bestimmte Trägheit auf, so daß ein Bildeindruck ≈ 0,1 s erhalten bleibt. Das beidäugige Sehen gestattet die Wahrnehmung eines räumlichen Bildeindrucks, weil aufgrund des Augenabstands (Basislänge) in jedem Auge ein etwas verschiedenes Bild entsteht, sofern die Objektentfernung nicht größer als ≈ 10 m ist. Dieser physiologische Effekt wird bei der *Stereoskopie* ausgenutzt.
Brillen dienen zur Korrektur von Augenfehlern, zur Verbesserung des Akkommodationsvermögens (Entfernungsanpassung) oder als Strahlungsschutz. Sie werden durch ihre *Scheitelbrechkraft* gekennzeichnet, die in *Dioptrien* (dpt ≙ 1/Brennweite in Metern) angegeben wird. Unter der Scheitelbrechkraft versteht man die

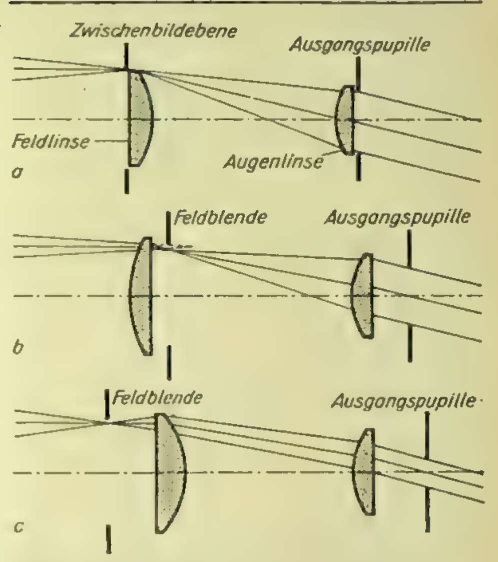


Abb. 12.3.3-1 Okulare a mit Feldlinse in der Zwischenbildebene, b davor (Huygenssches Okular) und c dahinter (Ramsdensches Okular)

reziproke Scheitelbrennweite, die Entfernung zwischen augenseitigem Linsenscheitel und bildseitigem Brennpunkt. Die mit gewöhnlichen Brillengläsern korrigierbare Fehlsichtigkeit beträgt −40 bis +20 dpt.
Im allgemeinen werden Brillen mit meniskenförmigen Linsen (Linsen mit nach der gleichen Seite gekrümmten brechenden Flächen) verwendet, weil damit der astigmatische Fehler der Brillengläser klein gehalten wird. Um den Astigmatismus des Auges zu beheben, werden Brillengläser mit zusätzlicher Zylinderkrümmung benutzt. Bestimmte Augenfehler lassen sich nur durch *Haftschalen* korrigieren, die direkt auf die Hornhaut des Auges aufgesetzt werden. *Mehrstärkengläser* sind aus 2 (Nah- und Fernteil) oder mehreren Teilen unterschiedlicher Brechkraft aufgebaut. Ändert sich die Brechkraft vom Fern- zum Nahteil kontinuierlich, so spricht man von Gläsern mit gleitendem Fokus (*Gleitfokusgläser*).
Fernrohr- und *Lupenbrillen* beinhalten korrigierte Linsensysteme. *Strahlenschutzbrillen* werden verwendet, um die Augen vor zu intensiver Strahlung, insbesondere in bestimmten Spektralbereichen (UV-, IR- und Laserstrahlung), zu schützen. Die verwendeten Gläser haben Filterwirkung mit unterschiedlicher spektraler Durchlässigkeit, z. B. Sonnen-, Schweißer- und medizinische Brillen.
Lupen und Okulare. Die Lupe ist das einfachste optische Hilfsmittel, das ein vergrößertes virtuelles Bild eines Gegenstands erzeugt (vgl. 12.3.1.).

Okulare (Abb. 12.3.3-1) dienen zur Betrachtung eines vom Objektiv erzeugten Zwischenbilds. Im einfachsten Fall sind sie aus Augen- und Feldlinse aufgebaut. Wenn sich das Objekt oder das Zwischenbild in der Brennebene der Lupe bzw. des Okulars befindet, entsteht ein virtuelles Bild im Unendlichen. Okulare gestatten durch Längsverschiebung eine Akkommodation auf das Zwischenbild. Die Vergrößerungen von Lupe und Okular sind auf den Scheindruck bei deutlicher Schweite unter 25 cm Betrachtungsabstand bezogen (Normalvergrößerung). Die Normalvergrößerung ist dann durch 25 cm/*f'* (Brennweite in cm) gegeben. Lupen mit bis zu dreifacher Vergrößerung sind Einzellinsen, Lupen für stärkere Vergrößerungen (bis 30fach) sowie Okulare bestehen aus Linsensystemen, bei denen Farb- und andere Abbildungsfehler korrigiert sind. Befindet sich die Feldlinse, die eine gleichmäßige Ausleuchtung des Blickfelds gewährleistet, vor der Zwischenbildebene, so spricht man von einem *Huygensschen Okular*, steht sie in oder hinter der Zwischenbildebene, von einem *Ramsdenschen Okular*. In der reellen Zwischenbildebene können *Meßmarken* vorgesehen werden.

Das *Gaußsche Okular* ist ein optisches System mit positiver Brennweite und beleuchteter Meßmarke, z. B. einem Fadenkreuz. Die Beleuchtung erfolgt über einen teildurchlässigen Spiegel oder ein Prisma. Okulare mit negativer Brennweite haben keine reelle Zwischenbildebene, so daß bei ihnen keine Meßmarken vorhanden sind.

Mikroskope sind optische Geräte, die dem Auge kleine Gegenstände stark vergrößert darbieten. Das *Objektiv* erzeugt ein reelles und vergrößertes Zwischenbild des Gegenstands, das entweder durch das *Okular* betrachtet (Abb. 12.3.3-2), auf eine Mattscheibe projiziert oder fotografiert werden kann (Tafel 46). Mit konventionellen Lichtmikroskopen ist maximal eine 1500fache Vergrößerung möglich. *Rastermikroskope* arbeiten mit einer zeilenweisen Abtastung des Objekts durch einen Lichtpunkt (vgl. Lichtpunktabtaster, 11.4.5.). Entsprechend der örtlich unterschiedlichen Transparenz schwankt der durch das Objekt hindurchtretende Lichtstrom und bewirkt eine objektähnliche Wiedergabe auf einem Bildschirm.

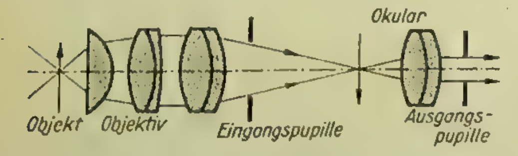


Abb. 12.3.3-2 *Strahlengang im Mikroskop (EP = Eingangspupille, AP = Ausgangspupille)*

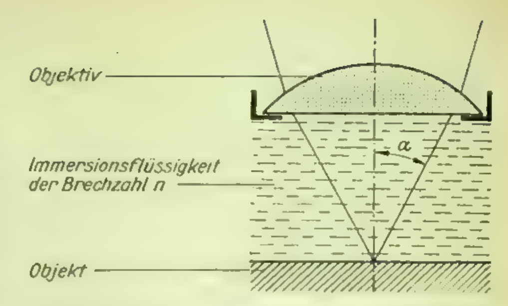


Abb. 12.3.3-3 *Numerische Apertur eines Immersionsobjektivs ($A = n \cdot \sin\alpha$)*

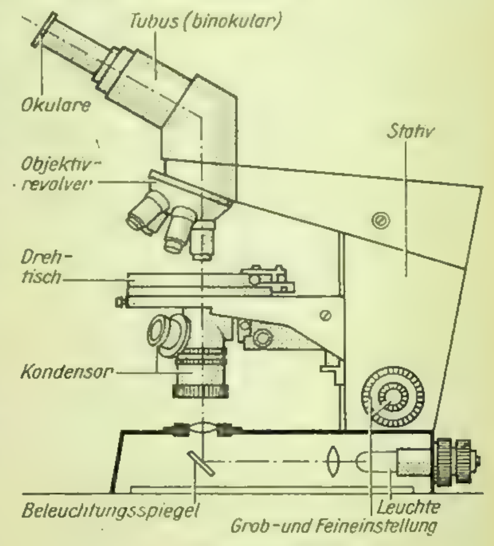


Abb. 12.3.3-4 *Forschungsmikroskop*

Auflösungsvermögen. Darunter versteht man den kleinsten auflösbaren Strukturabstand. Er berechnet sich zu $a = \lambda/2A$, wobei λ die Wellenlänge des Lichts im Vakuum und A die numerische Apertur des Objektivs ist ($A = n \cdot \sin\alpha$, vgl. Abb. 12.3.3-3). Nach der *Abbeschen Theorie* der mikroskopischen Abbildung wird ein abgebildeter Gegenstand um so deutlicher, je höher die Anzahl der vom Objekt erfaßten Beugungsmaxima ist. Das Auflösungsvermögen kann durch Anwendung kurzwelligen Lichts (UV-Mikroskopie) oder durch die Erhöhung der numerischen Apertur gesteigert werden. Letzteres ist neben der Vergrößerung des Aperturwinkels α durch Ausfüllen des Raums zwischen Objekt und Objektiv mit einer Immersionsflüssigkeit ($n > 1$), dem *Immersionsobjektiv* (Abb. 12.3.3-3), möglich. Eine Mikroskopvergrößerung über das 1500fache der numerischen Apertur ist bei Verwendung sichtbaren Lichts nicht möglich. Bedingt durch das begrenzte Auflösungsvermögen können keine feineren Strukturen erkannt werden (*leere Vergrößerung*).

Aufbau. Mikroskopobjektiv und -okular sind durch den *Tubus* verbunden, der mit dem *Objekttisch* und der Beleuchtungseinrichtung durch das Stativ konstruktiv verbunden ist (Abb. 12.3.3-4). Tubus und Objekttisch sind längs der Tubusachse durch Grob- und Feintrieb zur Scharfeinstellung verschiebbar. Die Beleuchtungseinrichtung ist so aufgebaut, daß das Objekt mit Parallelbündeln durchstrahlt wird und sich die Beleuchtungsstärke in der Objektebene und die Größe des ausgeleuchteten Felds unabhängig voneinander durch Veränderung der Durchmesser der Apertur- bzw. Leuchtfeldblende regeln lassen (*Köhlersches Beleuchtungsprinzip*, Abb. 12.3.3-5). Neben den *Durchsichtsmikroskopen* gibt es auch *Auflichtmikroskope* für die Metallmikroskopie. Bei *Dunkelfeldmikroskopen* wird das direkte Licht ausgeblendet, so daß nur das vom Objekt gebeugte Licht zur Abbildung beiträgt.

Polarisationsmikroskope werden zu Untersuchungen in der Kristalloptik eingesetzt. In ihnen wird das Objekt mit polarisiertem Licht beleuchtet und durch Polarisationsfilter betrachtet. Dadurch werden Veränderungen des Polarisationszustands des Lichts durch optisch anisotrope Objekte sichtbar.

Interferenzmikroskope sind *Zweistrahlinterferometer*, die häufig zur Prüfung technischer Oberflächen eingesetzt werden (vgl. 13.3.1.).

Phasenkontrastmikroskope dienen der Untersuchung von Objektstrukturen, die sich nur durch ihre Brechzahl und nicht durch ihre Absorption von ihrer Umgebung unterscheiden. Brechzahlunterschiede führen aber zu einer Veränderung der Lichtwellenphase (*Phasen-Kontrast*). Im Phasenkontrastmikroskop werden selbst kleine Phasenänderungen in Intensitätsunterschiede (*Helligkeitskonktrast*) umgewandelt und so dem Auge sichtbar gemacht. Auf diese Weise lassen sich z. B. lebende Zellen ohne Eingriffe (chemische Färbung) beobachten.

Elektronenmikroskop. Da das Auflösungsvermögen bei den Mikroskopen von der verwendeten Wellenlänge abhängig ist, werden beim Elektronenmikroskop Elektronenstrahlen zur Abbildung benutzt, deren Wellenlänge bei ≈ 0,01 nm liegt (Wellenlänge des Lichts ≈ 400 bis 700 nm). Auf diese Weise werden bei einer Auflösung von 0,3 nm Vergrößerungen von $1:10^5$ bis $1:10^6$ erreicht. Die Elektronenstrahlen können durch

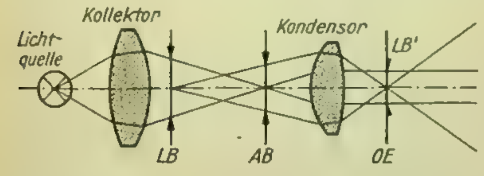


Abb. 12.3.3-5 Köhlersches Beleuchtungsprinzip (Durchlicht). LB = Leuchtfeldblende, AB = Aperturblende, OE = Objektivebene und LB' = Bild der Leuchtfeldblende

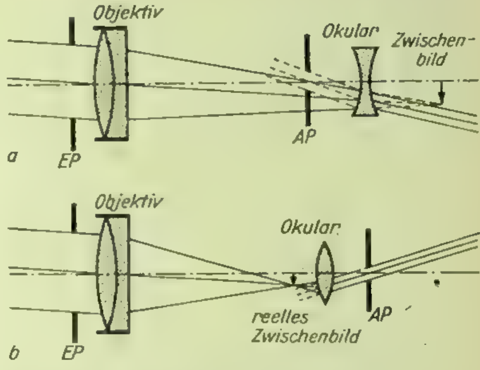


Abb. 12.3.3-6 a Galileisches (Holländisches) Fernrohr, b Keplersches Fernrohr (EP = Eingangspupille, Ap = Ausgangspupille)

elektrostatische und magnetische Felder abgelenkt und fokussiert werden. Die Elektronen werden von einer Glühkatode emittiert und durch eine Spannung von 40 bis 150 kV beschleunigt. Die erzielte, stark vergrößerte Abbildung erscheint auf einem fluoreszierenden Leuchtschirm oder auf einer Fotoschicht.

Die Durchstrahlung des Objekts kann nur im Vakuum erfolgen, so daß es durch eine Objektschleuse in die Röhre gebracht werden muß. Bedingt durch die schwache Durchdringungsfähigkeit der Elektronen können nur Präparate mit sehr geringer Schichtdicke untersucht werden. Für indirekte Untersuchungen werden Dünnschicht-Abdrücke in Lack, Kohle, Metall oder Quarz von dem Objekt angefertigt, die dann durchstrahlt werden, um Form und Oberflächenbeschaffenheit zu ermitteln. Varianten des Elektronenmikroskops sind das *Emissionsmikroskop*, bei dem die vom Objekt emittierten Sekundärelektronen zur Untersuchung genutzt werden, das *Rastermikroskop*, bei dem ein stark gebündelter Elektronenstrahl das Objekt zeilenweise abtastet, und das *Feldelektronenmikroskop*, das ohne Elektronenlinsen arbeitet. Bei letzterem wird das zu untersuchende Präparat auf eine als Katode dienende Drahtspitze im Innern eines evakuierten Kolbens aufgebracht. Nach Anlegen einer Spannung von mehreren Kilovolt werden durch Feldemission Elektronen emittiert, die auf einer Leuchtstoffschicht die Struktur der Katodenoberfläche darstellen. Die Anwendung und weitere Bedeutung der Elektronenmikroskopie hängt in starkem Maße von der Steigerung der Präpariertechnik ab.

Fernrohre zeigen Gegenstände unter einem größeren Sehwinkel, bringen sie damit dem Betrachter näher und vergrößern sie. Für den visuellen Gebrauch sind sie aus mindestens 2 optischen Gliedern, dem *Objektiv* und dem *Okular*, auf-

gebaut (Tafel 46). Das Objektiv hat stets eine sammelnde optische Wirkung (als Linse bzw. Linsensystem oder als Hohlspiegel). Bei Okularen mit negativer Brennweite ergeben sich aufrechte Bilder, wie z. B. beim *Galileischen Fernrohr* (Theaterglas, Abb. 12.3.3-6a), während bei Okularen mit positiver Brennweite umgekehrte Bilder entstehen (*Keplersches Fernrohr*, Abb. 12.3.3-6b). Durch Zwischenabbildung über ein Umkehrsystem kann hier das Bild aufgerichtet werden.

Die *Vergrößerung des Fernrohrs* ist gleich dem Quotienten von Objektiv- zur Okularbrennweite bzw. von Eintritts- (Objektivdurchmesser) zur Austrittspupille. Das Galileische Fernrohr hat eine virtuelle, vor dem Okular liegende und damit dem Auge nicht zugängliche Austrittspupille, wodurch sich eine Art „Schlüssellochbeobachtung" ergibt. Beim Keplerschen Fernrohr ist die Austrittspupille reell und sollte im Durchmesser etwa dem der Augenpupille entsprechen.

Feldstecher, *Theatergläser* und *Stereo-Entfernungsmesser* sind binokulare Fernrohre, die bei der Betrachtung mit beiden Augen einen räumlichen Eindruck ergeben. Durch Vergrößern der Basislänge bis auf ≈ 10 m ist bei den Entfernungsmessern bis zu 100 km ein räumlicher Eindruck festzustellen.

Schnittbild-Entfernungsmesser werden in Fotokameras und als *Tachymeter* in der Geodäsie verwendet (Tafel 46). Es sind Fernrohre mit 2 Objektiven für je ein Halbbild und ein Okular. Bei richtiger Entfernungseinstellung ergänzen sich die beiden Halbbilder zu einem geschlossenen Bild. Der Abgleich, d. h. das gegenseitige Verschieben der beiden Halbbilder, erfolgt mit optischem Mikrometer (Glaskeile, Schiebelinsen oder Schwenkspiegel).

Kollimatoren sind Fernrohrsysteme, die im wesentlichen aus einem Objektiv mit positiver Brennweite und einer Marke bestehen, die sich in einer Brennebene befinden. Sie dienen im Laboratorium zur Darstellung und Realisierung von unendlich fernen Zielen. Bei *Autokollimatoren* wird ein Bild oder eine Marke beobachtbar in sich selbst abgebildet. Die Selbstabbildung erfolgt über einen Planspiegel, der das Licht bei Neigung bzw. Kippung um den doppelten Winkelwert ablenkt. Damit lassen sich sehr genau kleinste Richtungs- und Neigungsänderungen feststellen.

Als *astronomische Fernrohre* werden *Refraktoren*, d. h. *Linsenfernrohre* des Keplerschen Typs, oder *Reflektoren*, d. h. *Spiegelteleskope*, verwendet, die eine starke Vergrößerung und ein relativ großes Bildfeld aufweisen. Die nutzbare Vergrößerung wird analog den Verhältnissen beim Mikroskop durch das endliche Auflösungsvermögen begrenzt, das mit wachsender relativer Öffnung zunimmt. Die relative Öffnung (Öffnungsverhältnis) von Refraktoren ist < 1:15; Reflektoren erreichen Öffnungsverhältnisse bis ≈ 1:3.

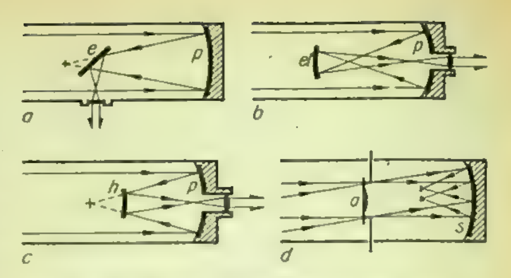


Abb. 12.3.3-7 Spiegelteleskope a nach Newton, b nach Gregory, c nach Cassegrain, d nach Schmidt (Prinzip)

Spiegelteleskope bilden das Objekt durch einen parabolischen Hauptspiegel als ein Zwischenbild ab, das durch einen ebenen, elliptischen oder hyperbolischen Hilfsspiegel aus dem System herausgeführt wird (Tafel 47). Dadurch wird der zentrale Teil des abbildenden Bündels abgeschattet (ringförmige Eintrittspupille). Das nutzbare Gesichtsfeld beträgt max. 1°.

Das *Schmidt-Spiegelteleskop* (Abb. 12.3.3-7) hat einen sphärischen Hauptspiegel, dessen Abbildungsfehler durch eine asphärische Korrektionsoptik (a) ausgeglichen werden. Das Gesichtsfeld beträgt 11°. Um die scheinbare Himmelsbewegung durch die Rotation der Erde aufzuheben, sind in der Montierung der astronomischen Fernrohre entsprechende Nachführ-Steuereinrichtungen vorgesehen.

Sonnenteleskope sind feststehende Fernrohre, bei denen die Nachführung durch Drehung eines ebenen Spiegels erfolgt. Sie werden in Kombination mit Filtern und Spektrografen zur Untersuchung von Vorgängen auf der Sonne eingesetzt.

Um optische Störungen bei astronomischen Beobachtungen, z. B. durch Temperaturschwankungen in der Erdatmosphäre, Luftschlieren und -trübungen, zu vermindern bzw. zu beseitigen, werden Teleskope auf hohen Bergen aufgestellt oder durch Ballons bzw. Erdsatelliten in große Höhen gebracht.

Fotokamera. Für die Größe der Kamera ist vor allem das Bildformat (Tab. 12.3.3-8) maßgebend. Nach dem Aufbau unterscheidet man die ein-

Tab. 12.3.3-8 *Kameraaufnahmeformate*

Kleinstformat (16-mm-Film)	11 mm × 14 mm
Kleinbildformat (35-mm-Film)	18 mm × 24 mm
	24 mm × 24 mm
	24 mm × 36 mm
Mittelformat (Rollfilm 6 cm × 9 cm)	6 cm × 6 cm
Großformat (Platten, Planfilm, bei 6,5 cm × 9 cm auch Rollfilm)	6,5 cm × 9 cm
	9 cm × 12 cm
	10 cm × 15 cm
	13 cm × 18 cm
	18 cm × 24 cm

fache *Boxkamera* mit unveränderlicher Objektiveinstellung (Fixfokus), die *Tubuskamera*, bei der das verstellbare Objektiv mit dem Gehäuse durch den Tubus verbunden ist, die *Balgenkamera*, bei der ein Lederbalgen die Objektivstandarte zur Entfernungseinstellung mit dem Gehäuse verbindet, sowie die *Spiegelreflexkamera*. Bei letzterer wird das Bild von einem geneigten Spiegel in der Kamera seitenverkehrt auf eine Mattscheibe projiziert, auf der es scharf eingestellt wird (z. B. PRAKTICA L). Die *Stereokamera* besitzt 2 Objektive mit gekuppelten Einstellungsmechanismen. Die beiden aufgenommenen Bilder werden bei Betrachtung durch eine Polarisationsbrille oder ein Stereoskop zu einem räumlich wirkenden Bild vereinigt.

Fotografische Objektive sind korrigierte Linsensysteme, die zur optischen Abbildung des Objekts auf die fotografische Schicht dienen (Abb. 12.3.3-9). Sie werden nach ihrer relativen Lichtstärke und Brennweite unterschieden. Die relative Lichtstärke ist das Öffnungsverhältnis des Objektivs und ergibt sich als Quotient aus Öffnungsdurchmesser und Brennweite.

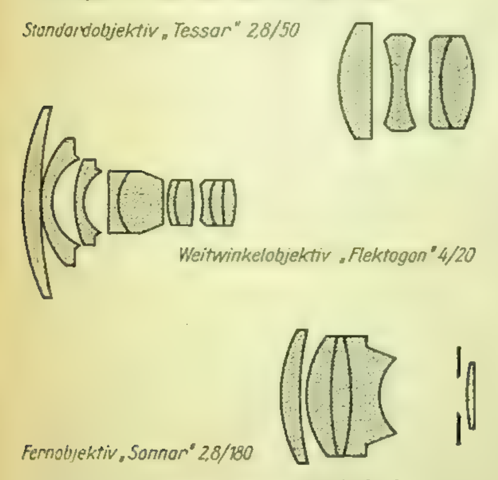


***Abb. 12.3.3-9** Linsensysteme (-schnitte)*

Es ist jedoch üblich, die Lichtstärke des Objektivs durch die kleinste *Blendenzahl* als Kehrwert des Öffnungsverhältnisses zu charakterisieren.

Die *Brennweite* ist bei normalen Fotoobjektiven konstant. Bei der *Vario-Optik*, auch „Gummilinse" genannt, ist die Brennweite durch Verschieben einzelner Linsengruppen innerhalb des Objektivs veränderlich. Zu unterscheiden sind *Standardobjektive* mit normaler, *Weitwinkelobjektive* mit kurzer und *Fern-* oder auch *Teleobjektive* mit langer Brennweite. Bei hochwertigen Kameras ist ein Auswechseln von Objektiven mit unterschiedlicher Brennweite möglich (*Wechselobjektive*).

Zur Anpassung an die Objektentfernung wird der Abstand des Objektivs zur Fotoschicht verändert. Diese Scharfeinstellung erfolgt durch Verdrehen des in einem Gewindegang gehaltenen Objektivs. Auf einem Ring am Objektiv ist die eingestellte Objektiventfernung ablesbar.

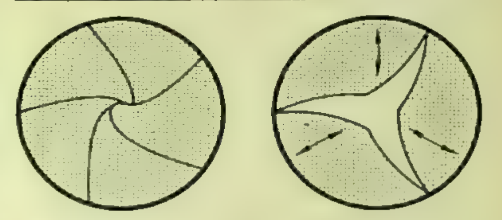


***Abb. 12.3.3-10** Zentralverschluß mit links 5 und rechts 3 Lamellen (z. T. geöffnet)*

Blende. Sie ist im Objektiv die maßgebende Lichtdurchtrittsöffnung mit veränderlichem Durchmesser. Damit läßt sich die Lichtmenge steuern, die bei einer bestimmten Belichtungszeit zur Fotoschicht gelangt. Die Kenngröße ist hier die *Blendenzahl k* (Verhältnis von Brennweite zum Blendendurchmesser), deren Werte international als geometrische Reihe (k = 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; ...) festgelegt sind. Außer bei einfachen Kameratypen mit *Lochblenden* sind die üblichen Objektive mit einer *Irisblende* ausgestattet. Hier läßt sich die Lichtdurchtrittsöffnung durch eine zentrale Verstellung von mehreren sichelförmigen Metallamellen über einen Außenring vornehmen. Mit der Verdrehung des Außenrings wird die jeweilige Blendenzahl angegeben, wobei sich zur benachbarten Blendenzahl die wirksame Lichtmenge halbiert bzw. verdoppelt.

Bei Spiegelreflexkameras sind die Blenden mit besonderen Vorrichtungen ausgerüstet. In der Vorbereitungsstellung sind sie voll geöffnet und ergeben ein helles Sucherbild, das gleichzeitig eine exakte Kontrolle der Scharfeinstellung gestattet. Unmittelbar vor der Aufnahme stellt sich die Blende auf die vorgegebene Blendenzahl ein. Je nach Ausführungsform unterscheidet man *Vorwahl-*, *Spring-* oder *Druckblende*. Das Wiederöffnen der Blende erfolgt entweder von Hand oder selbsttätig.

Verschluß. Er gestattet einen zeitlich begrenzten, auf vorgegebene Werte einstellbaren Lichtdurchtritt durch das Objektiv und steuert damit die Belichtungszeit.

Zentralverschluß (Abb. 12.3.3-10). Er befindet sich in der Regel zwischen den Objektivlinsen in der Nähe der Blende und besteht aus dünnen Metallamellen, die durch ein Federwerk zentral von innen geöffnet und wieder geschlossen werden. Die kürzeste Belichtungszeit beträgt hier ≈ $^1/_{750}$ s.

Schlitzverschluß (Abb. 12.3.3-11). Er besteht aus 2 schwarzen Vorhängen oder Metallrollos, die sich dicht vor der Fotoschicht befinden. Nach Auslösung läuft der Vorhang *1* ab und öffnet die

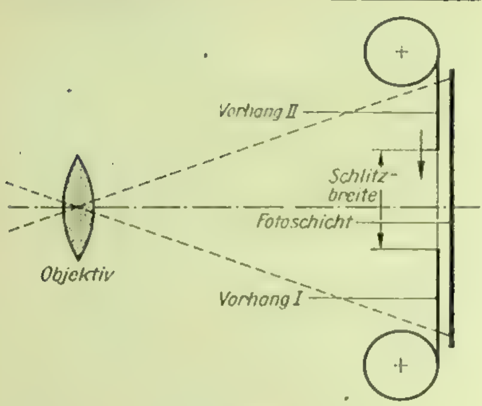


Abb. 12.3.3-11 Schlitzverschluß

Blende. Entsprechend der gewählten Belichtungszeit folgt der Vorhang *II* und deckt wieder ab. Bei Belichtungszeiten $\leqq {}^1/_{60}$ s laufen beide Vorgänge kurz hintereinander, so daß zwischen den beiden Vorhangkanten ein Schlitz entsteht, der sich an der Fotoschicht vorbeibewegt. Durch sehr kleine Schlitzbreiten lassen sich kleinste Belichtungszeiten bis zu ${}^1/_{2000}$ s erreichen. Beim Spannen des Verschlusses werden beide Vorgänge bei gegenseitiger Überlappung, d. h. ohne Belichtung, zurückgerollt.

Verschlußsteuerung. Unterschiedliche Belichtungszeit wird erreicht, indem die Zeit zwischen Öffnen und Schließen des Verschlusses gesteuert wird. Dies kann mechanisch durch Ablauf eines Hemmwerks oder elektronisch durch entsprechende Bauelemente kombiniert mit elektromechanischer Auslösung erfolgen. Die Standardbelichtungszeiten sind: 1, ${}^1/_2$, ${}^1/_4$, ${}^1/_8$, ${}^1/_{15}$, ${}^1/_{30}$, ${}^1/_{60}$ ... s.

Filmtransporteinrichtung. Durch Betätigen eines Spannhebels oder Drehen eines Knopfs wird

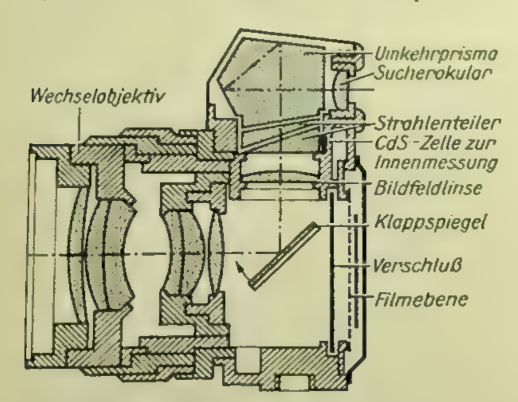


Abb. 12.3.3-12 Schnitt durch eine einäugige Spiegelreflexkamera

nach der Aufnahme der Film um eine Bildlänge weiterbewegt und gleichzeitig der Verschluß neu gespannt. Mit der Spann- und Transporteinrichtung ist eine Auslösesperre gekoppelt; damit wird die Verschlußauslösung wieder freigegeben und Doppelbelichtung vermieden.

Sucher. Er gestattet, die bildmäßige Wirkung des Aufnahmemotivs zu beurteilen. Normalerweise wird der optische Sucher als umgekehrtes Galileisches Fernrohr benutzt. Bei Spiegelreflexkameras (Abb. 12.3.3-12) wird das Bild, das durch das Objektiv entsteht, parallaxenfrei auf einer horizontalen Bildfeldlinse betrachtet. Hierzu wird dieses Bild in der Vorbereitungsstellung durch einen Spiegel umgelenkt. Unmittelbar vor der Belichtung wird der Spiegel hochgeklappt und der Lichtweg zum Schlitzverschluß mit dahinterliegender Fotoschicht freigegeben. Durch ein Umkehrprisma über der Bildfeldlinse erhält man ein Sucherbild, das in Aufnahmerichtung betrachtet werden kann.

Belichtungssteuerung. Durch sie erfolgt die Dosierung der Lichtmenge, die auf die Fotoschicht gelangt. Störgröße ist die Objektleuchtdichte, die sich aus den Licht- und Leuchtverhältnissen ergibt. Führungsgröße ist die Lichtempfindlich-

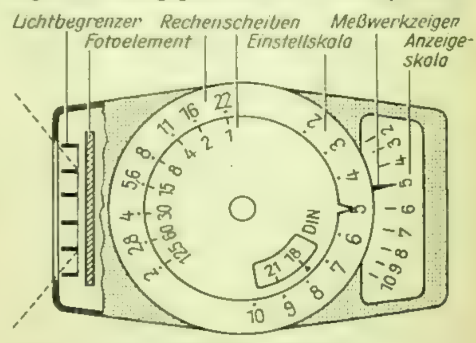


Abb. 12.3.3-13 Belichtungsmesser

keit der Fotoschicht. Die Steuerung der Lichtmenge erfolgt durch die Wahl der Blendenzahl bzw. der Belichtungszeit. Blendenzahl und Belichtungszeit sind gleichwertige Steuergrößen. Das erschwert die Belichtungssteuerung, weil stets entschieden werden muß, welchen Anteil die Blenden- und Zeitverstellung haben sollen. Kleine Objektivöffnung, d. h. große Blendenzahl, begünstigt die Schärfentiefe der Aufnahme und kleine Belichtungszeit vermeidet Bildunschärfe durch Objektivbewegung oder Verwakkeln der Kamera bei der Belichtung.

Voraussetzung für eine Belichtungssteuerung ist die Messung der Objektleuchtdichte mit Hilfe eines fotoelektrischen *Belichtungsmessers* (Abb. 12.3.3-13). Der Zeigerausschlag am Meßwerk, der durch den Fotostrom des lichtelektrischen Empfängers (z. B. Selenfotoelement) entsteht, kennzeichnet die Objektleuchtdichte und gilt als Richtwert für die Belichtungssteuerung. Bei den Belichtungsmessern wird mit Hilfe

von Rechenscheiben der Zeigerausschlag benutzt, um unter Berücksichtigung der Filmempfindlichkeit geeignete Kombinationen von Blendenzahl und Belichtungszeit zu erhalten. Eine *halbautomatische Belichtungssteuerung* erhält man, wenn der Belichtungsmesser in der Kamera eingebaut ist und ein Nachführzeiger zum Abgleich auf den Meßwerkzeiger mit der Einstellung von Belichtungszeit und/oder Blendenzahl gekoppelt ist (Abb. 12.3.3-14). Vorteilhaft ist die *Innenmessung*, weil hier dasjenige Licht gemessen wird, das tatsächlich zur Fotoschicht gelangt. Hierzu wird ein Teil des durch das Objektiv gelangenden Lichts auf einen Fotowiderstand aus Kadmiumsulfid abgelenkt. Eine *vollautomatische Steuerung* wird erreicht, wenn eine Lichtmengenmessung vorgenommen wird. Der Meßvorgang beginnt mit der Öffnung des Verschlusses und dieser schließt automatisch, wenn unter Berücksichtigung der eingestellten Blendenzahl und Filmempfindlichkeit die erforderliche Lichtmenge zur Fotoschicht gelangen konnte.

Blitzlicht dient zur kurzzeitigen Aufnahmebeleuchtung, wenn die vorliegenden Lichtverhältnisse unzureichend sind. Es gibt *Blitzlampen*, in denen eine Magnesiumfolie schnell verbrennt, und *Elektronenblitzgeräte*, bei denen eine Xenonlampe durch Entladung eines Kondensators kurz und intensiv aufleuchtet. Die Zündung erfolgt synchron mit dem Öffnen des Verschlusses.

Sofortbildfotografie. Durch besonderes Fotomaterial mit entsprechenden Chemikalien in Pastenform entsteht in der Kamera sofort nach der Belichtung ein fertiges positives Bild, und zwar ≈ 10 s bei schwarz-weißem und ≈ 60 s bei farbigem Papierbild (z. B. Polaroid-Verfahren und -Kamera).

Holografie ist ein aussichtsreiches Bildspeicherverfahren, das eine echte dreidimensionale Darstellung ermöglicht. Bei der Aufnahme wird ohne Objektiv auf der Fotoschicht ein *Hologramm* aufgezeichnet, das durch Interferenz von Lichtwellen entsteht (vgl. 12.3.2.). Diese Lichtwellen stammen von direktem Laserlicht und von Laserlicht, das am darzustellenden Objekt gebeugt wurde. Zur Wiedergabe wird das Hologramm mit kohärentem Licht durchleuchtet, und es entsteht ein Strahlungsfeld, das einen wirklichen Raumeindruck vom Objekt vermittelt. Die technischen Möglichkeiten in bezug auf die Größe des Bilds sind z. Z. noch sehr begrenzt.

Filmtechnik. Die Kinematografie gestattet aufgrund der Trägheit des menschlichen Auges die Darstellung von Bewegungs- bzw. Laufbildern. Werden dem Auge schnell hintereinander (mindestens 10 bis 12 Bilder/s) einzelne Phasenbilder eines Bewegungsablaufs dargeboten, dann verschmelzen diese Phasenbilder zu einem kontinuierlichen Bewegungsvorgang. Aus diesem Grunde sind die kinematografischen Geräte so ausgerüstet, daß sie Phasenbilder schnell hintereinander aufnehmen bzw. wiedergeben können. Träger dieser Phasenbilder ist ein Azetat-(Sicherheits-)Film mit international festgelegten Breiten von 35, 16 und 8 mm. Für Tonfilme gelten 24 Bildwechsel/s; für Stummfilme (16-mm- und 8-mm-Schmalfilm) sind 16 bzw. 18 Bildwechsel/s üblich.

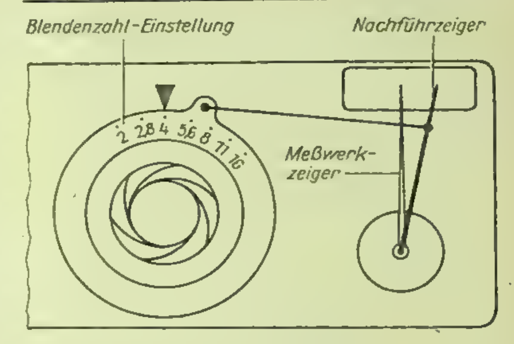


Abb. 12.3.3-14 Prinzip der halbautomatischen Belichtungssteuerung

Normalerweise ist die Bildfrequenz bei der Aufnahme und Wiedergabe die gleiche. Bei kleineren Aufnahmebildfrequenzen (1 Bild/min oder noch weniger) entsteht bei normaler Wiedergabefrequenz eine *Zeitraffung*, die zur Sichtbarmachung sehr langsamer Vorgänge verwendet wird. Umgekehrt werden bei wesentlich erhöhter Aufnahmebildfrequenz, als *Zeitdehnung* (auch „*Zeitlupe*") bezeichnet, die Bewegungsvorgänge entsprechend verlangsamt wiedergegeben. Aufnahmebildfrequenzen von 3000 bis 40000 Bilder/s und mehr verwendet man bei technischen und wissenschaftlichen Untersuchungen sehr schneller Bewegungsabläufe.

Aufnahmekameras für Laufbilder unterscheiden sich von denen für Stehbilder (Fotokameras) durch zusätzliche Einrichtungen für den Filmtransport sowie den Umlaufverschluß und den Antrieb durch Federwerk oder Elektromotor. Zwischen den Aufnahmen der einzelnen Phasenbilder wird der Film durch ein Schaltwerk absatzweise transportiert (Abb. 12.3.3-15). Der Umlaufverschluß gibt den Lichtweg zur Belichtung nur frei, wenn der Film stillsteht. Während der Transportphase erfolgt eine Lichtabdeckung durch den Flügel des Umlaufverschlusses. Vielfach ist dieser Flügel verspiegelt und schräg zur Aufnahmerichtung angeordnet, so daß ähnlich wie bei der Spiegelreflexkamera eine Beobachtung des Aufnahmemotivs über den *Reflexsucher* möglich ist.

Zeitdehneraufnahmen mit hohen Bildfrequenzen erfordern Spezialkameras mit kontinuierlichem Filmdurchlauf und optischer Bildnachführung, mit elektro-optischem Kurzzeitverschluß oder mit einer Hochfrequenzbeleuchtung.

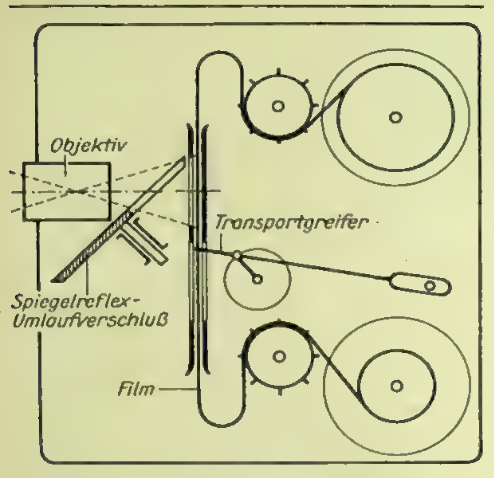


Abb. 12.3.3-15 Prinzip einer Kinekamera

Projektionsgeräte sind *Bildwerfer*, die zur Projektion von Steh- bzw. Laufbildern auf einer Bildwand dienen.

Stehbildwerfer werden vorzugsweise als *Diaprojektor* zur Projektion von Durchsichtsbildern (*Diapositive*) verwendet. Das gebräuchlichste Bildformat beträgt 5 cm × 5 cm (Kleinbildwerfer). Ein Stehbildwerfer besteht aus Beleuchtungseinrichtung (Lampe, Spiegel und Kondensor), Wechseleinrichtung für das Diapositiv, Projektionsobjektiv und lichtdichtem Gehäuse. Der Kondensor sammelt einen möglichst großen Teil des Lichtstroms der Lichtquelle und leitet ihn ins Projektionsobjektiv (Abb. 12.3.3-16).

Schreibprojektoren sind lichtstarke Bildwerfer für große Durchsichtsbilder (25 cm × 25 cm) mit horizontaler Bildebene. Sie gestatten die Wiedergabe von Schrift und Bild auf einer Bildwand für Lehrzwecke, Vorträge usw. während der Aufzeichnung mit einem geeigneten Farbstift auf einer durchsichtigen Schreibfolie. Für den Kondensor, der den Lichtstrom durch die Schreibfläche wieder im Objektiv zusammenfaßt, wird auch eine Kunststoff-Stufenlinse (*Fresnel-Linse*) mit sehr kleiner Stufenteilung und Luftkühlung verwendet. Um in einem nur gering abgedunkelten Raum ein helles Projektionsbild zu erhalten, haben die Schreibprojektoren eine hohe Lichtleistung (Abb. 12.3.3-17).

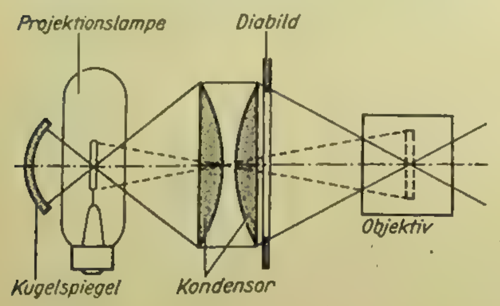


Abb. 12.3.3-16 Prinzip eines Diaprojektors

Episkope (Aufsichtsbildwerfer) dienen zur Wiedergabe undurchsichtiger Vorlagen, die von einer oder mehreren Lichtquellen beleuchtet werden. Da nur sehr wenig des von der Vorlage zurückgestrahlten Lichts vom Objektiv erfaßt wird, sind die projizierten Bilder relativ lichtschwach.

Laufbildwerfer ermöglichen die Wiedergabe der einzelnen Phasenbilder auf dem Film, so daß bei der schnellen Bildfolge ein kontinuierlicher Bewegungsablauf als Laufbild wahrgenommen wird. Wie in der Kamera wird der Film absatzweise transportiert und in der Transportphase der Strahlengang zur Bildwand durch einen Umlaufverschluß unterbochen. Während des Stillstands des Films erfolgen noch 1 oder 2 Lichtunterbrechungen, damit ein Hell-Dunkel-Wechsel von 48 pro s eintritt, um Flimmererscheinungen zu vermeiden.

Die *Theaterkopie* trägt eine ≈ 2 mm breite Lichttonspur, die das zum Bild dazugehörige Schallereignis trägt. Bei dem *Lichttonverfahren* wird der Ton auf fotografischem Wege aufgezeichnet. Zur Lichttonwiedergabe sind die Filmprojektoren mit einem Lichttongerät ausgerüstet, mit dem die Lichttonspur bei sehr gleichmäßigem Filmdurchlauf abgetastet wird. Das *Magnettonverfahren* wird in der Filmtechnik vorwiegend für den Aufnahmeprozeß angewendet. Magnettonspur neben dem Film ist bei Schmalfilm – insbesondere für Fernsehabtastung – üblich. Das Magnettonverfahren mit Mehrkanalaufzeichnung (*Stereofonie*) hat sich aufgrund des zu großen Aufwands im Filmtheater nicht bewährt. Auch bei den anamorphotischen Breitwandverfahren („Totalvision", „Cinemascope") und dem 70-mm-Breitwandfilm („Todd AO") ist der Aufwand unverhältnismäßig hoch.

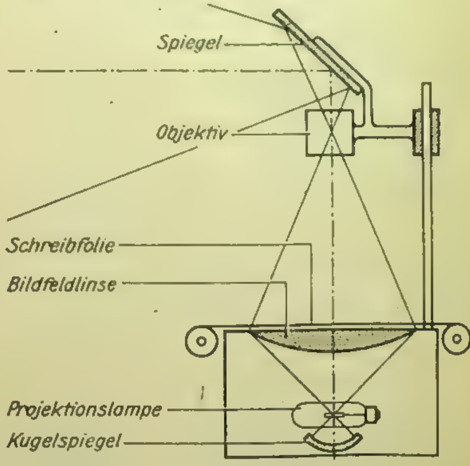


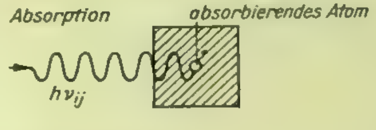
Abb. 12.3.3-17 Prinzip eines Schreibprojektors

Stereo-Filmprojektion (*Raumfilmverfahren*) gestattet eine Laufbildwiedergabe, die einen räumlichen Eindruck vermittelt. Die Wirkung beruht wie bei der Stereofotografie auf dem binokularen Raumsehen mit 2 Augen. Der Stereofilm hat von jedem Phasenbild 2 Stereobilder, die von 2 verschiedenen Standpunkten, dem Augenabstand entsprechend, aufgenommen wurden. Bei der Wiedergabe werden beide Stereobilder übereinander projiziert und für die Betrachtung optisch so getrennt, daß jedem Auge das ihm zugeordnete Stereobild erscheint. Die hier erforderliche Bildtrennung läßt sich am einfachsten durch unterschiedliche Polarisation des Projektionslichts der beiden Stereobilder erreichen. Der Betrachter muß dann eine Polarisationsbrille tragen, damit das rechte Auge nur das rechte Stereobild und das linke Auge nur das linke Stereobild sieht. Bei dem in der UdSSR entwickelten brillenlosen Verfahren (*Iwanow-Verfahren*) werden die beiden Stereobilder durch ein feines Raster vor der Bildwand hindurchprojiziert und damit das Bild in sehr feine Rasterstreifen zerlegt. Die senkrechten Rasterlücken ermöglichen die Betrachtung der jedem Auge zugeordneten Bildstreifen des rechten bzw. linken Stereobildes; dabei werden die Bildstreifen, die von dem anderen Auge nicht gesehen werden dürfen, durch die Rasterstreifen verdeckt. Es gibt im Wiedergaberaum nur bestimmte Stellen, wo der stereoskopische Effekt wahrnehmbar ist. Außerdem darf der Kopf bei der Betrachtung nicht seitlich bewegt werden, weil sonst die Augen den falschen Rasterstreifen wahrnehmen.

Die *stereoskopische Betrachtung* von projizierten Bildern ist für das Auge unnatürlich. Bei der normalen Betrachtung in der Natur verändern sich je nach Entfernung des Objekts die Akkommodation (Anpassung des Auges an die Objektentfernung) und die Konvergenz (Winkelstellung der Augen zueinander) stets gleichzeitig. Bei der stereoskopischen Betrachtung ist die Akkommodation durch den konstanten Abstand zur Bildwand unverändert und es muß allein die Konvergenz eingestellt bzw. angepaßt werden. Damit ergeben sich physiologische Schwierigkeiten zur schnellen und richtigen Erfassung des Raumbilds. Das gilt vor allem bei der Stereofilmprojektion, und es zeigen sich für den Betrachter Ermüdungserscheinungen und auch Kopfschmerzen. Aus diesem Grunde hat sich die Stereoprojektion in der Praxis nicht durchgesetzt, obwohl die technischen Voraussetzungen hierfür bereits seit Jahrzehnten vorhanden sind.

12.3.4. Laser und Maser

Laser und Maser sind quantenelektronische, auf einer induzierten Strahlungsemission beruhende Verstärker bzw. Generatoren für Licht- bzw.



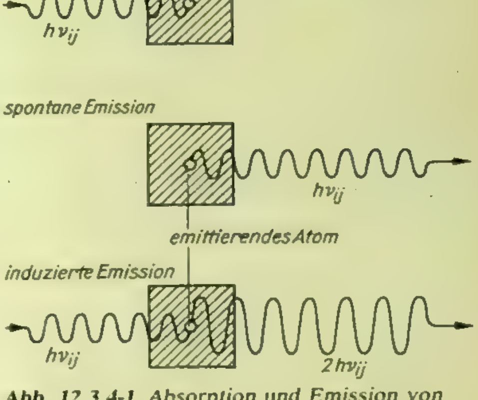


Abb. 12.3.4-1 *Absorption und Emission von Lichtquanten*

Mikrowellen. Die Bezeichnung ist eine Abkürzung für Light bzw. Microwave amplification by stimulated emission of radiation (Licht- bzw. Mikrowellenverstärkung durch angeregte oder induzierte Strahlungsemission).

Wirkungsprinzip. Die Elektronen eines Atoms befinden sich nur in ganz bestimmten Zuständen, die durch die Energieniveaus $E_1, E_2, E_3 \cdots E_n$ festgelegt sind. Wenn E_j das Niveau mit der höheren Energie ist, dann können Elektronen unter Energieemission von E_j nach E_i übergehen und umgekehrt unter Energieabsorption von E_i nach E_j. Die dabei frei werdende bzw. absorbierte Energie ist durch die Beziehung

$$\Delta E = |E_i - E_j| = h\nu_{ij}$$

gegeben, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und ν_{ij} die beim Sprung emittierte bzw. absorbierte Strahlungsfrequenz ist. Gelangt ein Elektron durch Energieaufnahme, z. B. durch Erwärmung oder Elektronenstoß, auf ein höheres Niveau, so kann es sowohl durch *spontane* als auch *induzierte Emission* in den Ausgangszustand zurückkehren (Abb. 12.3.4-1). Die Besetzung der Energieniveaus $E_1 < E_2 < E_3 < \cdots < E_n$ mit Elektronen erhält man aus dem Boltzmannschen Verteilungsgesetz. Im thermodynamischen Gleichgewicht gilt für die Besetzungszahlen $N_1 > N_2 > N_3 > \cdots > N_n$.

Maser und Laser beruhen auf der induzierten Emission von elektromagnetischer Strahlung. Damit eine wirksame Verstärkung einer eingestrahlten Frequenz, z. B. ν_{12} erfolgen kann, muß $N_2 > N_1$ sein, d. h. aber, es ist eine Besetzungsumkehr oder -inversion erforderlich. Dies erreicht man z. B. in einem Dreiniveausystem durch Einstrahlen der sog. *Pumpfrequenz* ν_{13}, wenn das System so beschaffen ist, daß die

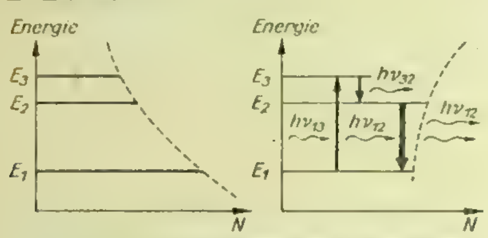


Abb. 12.3.4-2 Besetzungszahlen N eines Dreiniveaulasers bzw. -masers im thermodynamischen Gleichgewicht (links) bzw. nach Inversion (rechts)

Atome oder Moleküle durch strahlungslose bzw. spontane Übergänge schneller vom Zustand E_3 nach E_2 als von E_2 nach E_1 übergehen. E_2 wird dadurch gegenüber E_1 überbesetzt und bei Einstrahlung der Signalfrequenz ν_{12} können Übergänge von E_2 nach E_1 induziert werden (Abb. 12.3.4-2). Bei diesem Vorgang wird die Signalfrequenz verstärkt, wenn die induzierte Emission die Absorption überwiegt. Aus jedem Verstärkersystem wird durch Rückkopplung ein Generator. Dies kann mit Hilfe eines Resonators erreicht werden, der gleichzeitig noch eine Frequenzselektion bewirkt.

Maser. Beim Festkörpermaser sind in einem diamagnetischen Kristall paramagnetische Ionen als Fremdkörper in geringer Konzentration eingebaut. Die Energieniveaus dieser Ionen werden durch ein Magnetfeld aufgespalten und ergeben Energiedifferenzen, die den gewünschten Maserfrequenzen entsprechen. Durch Änderung der magnetischen Gleichfeldstärke ist es möglich, die Arbeitsfrequenz in einem weiten Bereich zu variieren. Als besonders geeignet haben sich Cromium-, Eisen-, Gadolinium- und Nickelionen erwiesen, die in Aluminium-, Titandioxid, Lanthanäthylsulfat und Kaliumkobaltcyanid eingebaut wurden.

Die Arbeitstemperaturen der Maser liegen meist zwischen 1,5 und 4,2 K, die Arbeitsfrequenz zwischen 1 und 70 GHz. Maser zeichnen sich durch sehr geringes Rauschen mit Rauschtemperaturen zwischen 3,5 und 20 K aus und sind dadurch zur Verstärkung sehr schwacher Signale geeignet. Maser werden in den Bodenstationen von Satellitenfunkverbindungen, in der Radioastronomie und in Radaranlagen eingesetzt. Von den Gasmasern hat vor allem der Ammoniakmaser als Frequenznormal (vgl. 12.1.3.) Bedeutung erlangt. Wegen des hohen Aufwands ist die Bedeutung des Masers zurückgegangen, da sich z. B. mit parametrischen Verstärkern bei geringerem Aufwand vergleichbare Rauschtemperaturen erreichen lassen.

Laser. *Festkörperlaser.* Der bekannteste Vertreter und zugleich erste verwirklichte Laser ist der *Rubinlaser.* Als aktives Medium sind in das Aluminiumoxid Chromionen eingebaut, die ein breites Absorptionsband bei 550 nm haben. Unter diesem befindet sich ein metastabiles Niveau E_2, auf dem die Energie gespeichert werden kann. Der Übergang von E_3 nach E_2 erfolgt schnell und strahlungslos. Als Pumplichtquelle dient eine Xenon-Blitzlampe mit hoher Impulsleistung, die den Rubinstab wendelförmig umgibt. Die Endflächen des Rubinstabs sind parallel geschliffen. Während die eine total verspiegelt ist, hat die andere eine Durchlässigkeit von nur wenigen Prozent. Beide zusammen bilden einen optischen Resonator. Die Strahlung des Lasers lösen in Richtung der Stabachse fortschreitende Lichtquanten aus, die durch spontane Emission entstanden sind. Diese Primärwelle wird durch induzierte Emission phasenrichtig verstärkt. Übersteigt dabei die Verstärkung die beim Hin- und Herlaufen zwischen den Spiegeln auftretenden Verluste, tritt Selbsterregung ein, die *Laserschwelle* ist erreicht, und ein kohärentes Lichtbündel großer Schärfe und hoher Leistung wird erzeugt. Die Strahlung hält an, solange das metastabile Niveau überbesetzt ist. Sehr große Impulsleistungen von $> 10^9$ W wurden mit den sog. *Riesenimpulslasern* erreicht, indem die Güte des optischen Resonators so gesteuert wird, daß nur für einen sehr kurzen Moment Selbsterregung eintreten kann. Als Substanzen für Festkörperlaser dienen auch Kalziumwolframat und -fluorid, neodymdotiertes Glas u. a. Anstelle fester Körper kann man auch Flüssigkeiten verwenden (*Flüssigkeitslaser*). Eine spezielle Entwicklung derselben sind die Farbstofflaser.

Gaslaser. Im Gegensatz zu den Festkörperlasern wird bei den Gaslasern die Besetzungsinversion meist nicht durch optisches Pumpen, sondern durch Elektronenstoß in einer Gasentladung erreicht. Sie bestehen aus einem Glasrohr, in dem sich eine geeignete Gasmischung, z. B. Helium-Neon, andere Edelgase, Stickstoff, Kohlenmonoxid und -dioxid, und die Elektroden für die Gasentladung befinden. Die Spiegel des optischen Resonators sind außerhalb der Laserröhre und senkrecht zu deren Achse angeordnet. Die Gasentladung wird durch eine hohe Gleich- oder hochfrequente Wechselspannung gespeist. Mit Kohlendioxidlasern hat man im kontinuierlichen Betrieb Leistungen von 10^3 W erreicht und mit Stickstofflasern im Impulsbetrieb Leistungen von 10^5 W.

Halbleiterlaser. Die am häufigsten verwendete Ausführung der Halbleiterlaser ist der sog. Injektionslaser. Das sind hochdotierte Halbleiterdioden, bei denen durch den Durchlaßstrom Ladungsträger in den *pn*-Übergang geschwemmt oder injiziert werden. In entarteten Halbleitern mit großer Bandlücke rekombinieren Löcher und Elektronen mit großer Wahrscheinlichkeit strahlend. Es tritt *Injektionslumineszenz* auf. Laserbetrieb erreicht man, indem 2 senkrecht zum

pn-Übergang befindliche Flächen planparallel geschliffen und poliert werden (optischer Resonator), und die Stromdichte hoch genug gewählt wird. In Halbleiterlasern wird die elektrische Energie unmittelbar in kohärente Lichtstrahlung umgeformt. Der Wirkungsgrad kann bei sehr niedrigen Temperaturen 70 bis 80 % erreichen. Wegen der hohen Verstärkung sind die Abmessungen der Kristalle sehr klein (< 1 mm). Als Material für Halbleiterlaser sind z. B. Galliumarsenid, Indiumarsenid, -phosphid, -antimonid und Mischkristalle dieser Substanzen geeignet. Kontinuierlicher Betrieb ist nur bei Temperaturen < 240 K möglich. Die erreichbaren Leistungen liegen bei einigen Watt. Der Halbleiterlaser ist wegen seiner schnellen und einfachen Modulationsmöglichkeit (Modulation des Diodenstroms) für die Informationsübertragung besonders geeignet.

Anwendungen der Laser. Mit Hilfe von Fokussierungslinsen lassen sich Laserstrahlen bis auf einen Leuchtfleckdurchmesser von 1 μm konzentrieren, d. h. bis in die Größenordnung einer Lichtwellenlänge. Dadurch werden Leistungsdichten bis zu $\approx 10^{14}$ W/cm^2 erreicht. In einem so fokussierten Laserstrahl verdampfen Metalle und Keramik, können kleinste Bohrungen ausgeführt (vgl. 8.3.3.), Operationen an der Netzhaut vorgenommen werden u. a. mehr. In der Vermessungs- und Bautechnik dient der Laserstrahl als Bezugsgerade, z. B. im Straßen-, Tunnel-, Brücken- und Hochbau. Das Gebiet der nichtlinearen Optik, d. h. die Untersuchung und Nutzung des feldstärkeabhängigen Übertragungsverhaltens bestimmter Medien für Licht, wurde durch den Laser experimentell erschlossen. Dem Einsatz der Laser für die Informationsübertragung steht bei großen Entfernungen die starke Dämpfung in der Atmosphäre entgegen. Dagegen ist es heute möglich, Lichtleiter mit sehr geringer Dämpfung ($\approx$ 1 dB/km) herzustellen, so daß kommerzielle Fernsprechübertragungsanlagen mit Lichtleitern schon – zumindest versuchsweise – eingesetzt werden (vgl. 11.4.). Große Anstrengungen werden unternommen, mit Hilfe von Lasern eine kontrollierte Kernfusion zu zünden (vgl. 2.1.3.). Laser ermöglichen auch die Aufzeichnung dreidimensionaler Bilder als Hologramme (vgl. 12.3.2.).

12.4. Geräte der Medizintechnik

Die Medizintechnik umfaßt die gesamte Ausstattung der Einrichtungen des Gesundheitswesens mit Instrumenten, Geräten und Anlagen. In zunehmendem Maße wird die Medizin von Meß- und Arbeitsmethoden der Physik, Chemie und Technik durchdrungen. Die Übertragung biologischer und medizinischer Erkenntnisse führte zur Entwicklung einer großen Zahl für den klinischen Gebrauch zugeschnittener Geräte, die prinzipiell auch auf allen anderen wissenschaftlich-technischen Gebieten eingesetzt werden. Bessere Ergebnisse durch neue Verfahren sind in der medizinischen Praxis und Forschung wesentlich auf den Einsatz medizintechnischer Geräte zurückzuführen. Die technischen Hilfsmittel helfen, krankhafte Veränderungen zu erkennen (Diagnostik), die Behandlung durchzuführen (Therapie) und den Behandlungsablauf zu kontrollieren, aber auch prophylaktische (vorbeugende) und metaphylaktische (nachsorgende) Maßnahmen zu unterstützen. Die Anwendung komplizierter medizinischer Geräte erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen Medizinern, Ingenieuren und Naturwissenschaftlern. Der Einfluß der Elektronik führte zu einem hohen Automatisierungsgrad der medizintechnischen Geräte.

12.4.1. Allgemeine Untersuchungs- und Behandlungstechnik

Unabhängig von der Art der Gesundheitseinrichtung, des klinischen Fachgebiets und Krankenguts werden bestimmte Grundausstattungen und Geräte, die für alle Fachgebiete notwendig sind, zur Untersuchung und Behandlung des Patienten benötigt.

Behandlungstische und -stühle. *Behandlungsstuhl.* Es gibt Ausführungen für sitzende, halbliegende und liegende Behandlungsstellung sowie Zubehör zur Fixierung von Kopf und Extremitäten. Für die Stomatologie (Zahnheilkunde), Gynäkologie (Frauenheilkunde) und Urologie (Lehre von der Erkrankung der Harnorgane) existieren Spezialausführungen.

Operationstische sind meist universell einsetzbar (Tafel 48). Sie können hydraulisch an alle Lagerungsarten angepaßt werden, die im Verlauf einer Operation erforderlich sind. Moderne Tische mit festverankerter Standsäule nehmen von einem Spezialfahrgestell Patient und Tischplatte auf und vermeiden so unnötige Patientenumlagerungen. Als Spezialausführung gibt es z. B. das *Extensionsgerät* zur Einrichtung von Knochenbrüchen in der Unfallchirurgie und Orthopädie.

Behandlungseinheit. Für die Fachgebiete der Stomatologie, Ophthalmologie (Augenheilkunde) und Mikrochirurgie gibt es komplette Einrichtungen, welche die Lagerung des Patienten und die Behandlungsgeräte in einer Einheit zusammenfassen und dadurch günstige Bedingungen für Arzt und Patient schaffen.

Behandlungsleuchten. *Untersuchungsleuchten* dienen zur Ausleuchtung einer Fläche von $\approx$ 10 cm Durchmesser. Sie besitzen Schutzeinrichtungen zur Vermeidung von Wärmebelästigung und elektrischen Störfaktoren.

Operationsleuchten sind die Kombination mehrerer Einzelleuchten zu einer Gesamtleuchte mit schattenloser Lichtwirkung und hoher Beleuchtungsstärke (≈ 40 000 lx). Sie werden als Dekkenleuchten über dem OP-Tisch, mit Dreh-, Kipp- und Hubverstellung in allen Ebenen, kombinationsfähig mit Zusatzleuchten, Farbfiltern, Foto-, Kino- und Fernseheinrichtungen ausgeführt.
Bestrahlungslampen verwenden für therapeutische Zwecke verschiedene Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums, z. B. IR- und UV-Licht.
Behandlungshilfsmittel. *Medizinische Instrumente* werden in allen Fachgebieten in unterschiedlicher Form als Messer, Scheren, Pinzetten, Klemmen, Zangen, Haken, Löffel, Sägen, Feilen, Bohrer usw. benötigt. Die verschiedenen Ausführungsformen resultieren aus der Anpassung an Art und Ausbildung des menschlichen Körpers und seiner Organe sowie der Zerlegbarkeit aus Gründen der Reinigung und Sterilisation. Für bestimmte chirurgische Eingriffe werden Sortimente, sog. Siebe, von Instrumenten zusammengestellt, die in einer bestimmten Anzahl und Art im Verlauf der Operation eingesetzt werden. Für Blinddarmoperationen z. B. umfaßt ein Sieb ≈ 120 Stück Instrumente in 26 verschiedenen Ausführungen.
Spritzen und Kanülen werden in unterschiedlichen Größen zur Verabreichung von Medikamenten und Präparaten benötigt. Die Einspritzmenge wird am geeichten Spritzenzylinder kontrolliert. Die Injektion erfolgt mittels Kanüle, z. B. unter die Haut (subkutan), in die Blutbahn (intravenös) oder in die Muskulatur (intramuskulär). In umgekehrter Weise ist auch Absaugung und Blutentnahme möglich. Verwendet werden Spritzen aus Metall, Glas und Kunststoff für einmaligen oder öfteren Gebrauch.
Stethoskope dienen zum Abhören der Herz- und Lungengeräusche. Dazu werden die Schallwellen von der Körperoberfläche des Patienten mittels mikrofonähnlicher Schallkapseln, Schläuche bzw. Röhrchen in die Ohren des Untersuchenden übertragen.
Blutdruckmesser werden zur routinemäßigen *Blutdruckbestimmung* in Verbindung mit dem Stethoskop verwendet. Mittels einer um den Oberarm des Patienten angelegten aufblasbaren Manschette wird die Arterie (Schlag- oder Pulsader) soweit abgeklemmt, bis der Puls nicht mehr fühlbar ist. Danach wird die Manschette entlüftet und der manometrische Wert beim Auftreten des Pulstones (*systolischer* Blutdruck) sowie bei seinem Abklingen (*diastolischer* Blutdruck) mit Quecksilber- oder Federmanometer gemessen. Zur Messung mit der Pelotte vgl. 13.2.5.

12.4.2. Fachspezifische Untersuchungs- und Behandlungstechnik

Hierunter sind medizintechnische Geräte zu verstehen, welche sich durch die spezifische Behandlungsart, z. B. Zahnbehandlung, Untersuchung von Körperhöhlen, Blase, Magen, Darm, und ihren dadurch bedingten Aufbau, wie Zahnbohrer, optische Geräte zur Ausleuchtung und zum Einblick in das Körperinnere, zu Spezialgruppen herausgebildet haben.
Dentalgeräte. Die *Dentaleinheit* stellt einen kompletten Arbeitsplatz zur Zahnbehandlung dar und verfügt je nach Ausführung über *Bohreinrichtungen* mit Motoren bis 75 000 U/min bzw. mit Turbinen bis 300 000 U/min, Elektro-, Warmwasser-, Kaltwasser-, Vakuum-, Luft- und Abwasserversorgung für Arbeitsfeldbeleuchtung, Mundspülung, Mundspray, Speichelabsaugung, Turbinenantrieb usw., Instrumentenablagen, Schaltanlagen, Röntgenfilmbetrachter, Behandlungsstuhl und Arztsessel (Tafel 49). Für die Herstellung von Zahnersatz werden technische Einrichtungen, wie Bohr-, Schleif-, Polier- und Verformungsmaschinen, benötigt.
Augenärztliche Geräte. Bei Untersuchungen des Gesichtsfelds mit dem *Kugelperimeter* werden mittels einer Projektionseinrichtung die Grenzen des Gesichtsfelds des Patienten festgestellt. Zur Beseitigung von Netzhautschäden durch Gewebeverkochung mittels Lichtstrahlen, z. B. Laserstrahlung oder Elektroenergie, werden *Koagulatoren* verwendet. *Probierbrillen*, *Refraktometer* zur Messung des Brechungsvermögens des Auges und *Sehprobengeräte* dienen für augenoptische Messungen. Spezielle Instrumente mit besonderer Feinheit werden in der Augenchirurgie eingesetzt.
Ophthalmologische Diagnostikeinheit. Dieses Gerät vereinigt in sich die wichtigsten Untersuchungs- und Gerätearten auf engstem Raum und vereinfacht und verkürzt dadurch die Behandlung wesentlich. Der Patient behält die einmal eingenommene Untersuchungsstellung bei, die Geräte werden nacheinander an den Patienten herangeschwenkt.
Orthopädische Geräte dienen z. B. der Streckung, Befestigung, Wiedereinrenkung und dem teilweisen Ersatz des Bewegungsapparats, z. B. der Arme, Beine, Gelenke, durch Prothesen.
Zur Behandlung von Knochenbrüchen und Gelenkschäden werden *Knochennägel*, *-schrauben*, *-platten* und *Gelenke*, z. B. komplette Hüftgelenke, verwendet, die mit Spezialwerkzeugen, wie Nagelgeräte, Bohrmaschinen und Knochenfräsen, operativ eingesetzt werden. Das *Extensionsgerät* ist eine Streckvorrichtung, das bei der Heilung von Knochenbrüchen eingesetzt wird und durch Gewichtsbelastung oder Schraubspindeln eine Zugkraft in Längsrichtung der Gliedmaßen ausübt.

Prothesen. Es werden einfache mechanische Gliednachbildungen, z. B. Beinprothesen, und technisch sehr aufwendige, myoelektronisch durch Ausnutzung von Muskelströmen gesteuerte Prothesen, wie Unterarmprothesen, zur Ausübung von Halte- und Greiffunktionen hergestellt.
Endoskope dienen der Betrachtung von Körperhohlen bei Untersuchungen und Behandlungen. Eingesetzt werden das *Otoskop* für das Ohrinnere, das *Laryngoskop* für den Kehlkopf und zur Durchführung der Intubation (Einführung eines Luftschlauchs), das *Bronchoskop* zur Betrachtung der Luftröhre und zur Lungenventilation, das *Gastroskop* für das Mageninnere, das *Laparoskop* fur die Bauchhöhle und die Leber, das *Amnioskop* zur Fruchtwasserbetrachtung, das *Kolposkop* für die Gebärmutter, das *Rektoskop* für den Mastdarm und das *Cystoskop* für die Harnblase. Die Betrachtung erfolgt mittels optischer Linsen- und Beleuchtungssysteme oder hochflexibler Lichtleitbündel, die aus Glasfasern bestehen und auch zur Bildübertragung dienen (vgl. 6.3.4. und 11.4.). Neben dem Einblick sind das Fotografieren, das Spülen, z. B. in der Blase, das Belüften der Bauchhöhle und Lunge, das Katheterisieren der Harnleiter, das Zerkleinern von Blasensteinen und das Schneiden bei Gewebeprobenentnahme und Abtrennung von Wucherungen mit über Bowdenzug bedienbaren Messern, Scheren und Zangen bzw. durch Elektroschneidgeräte möglich. Die Endoskope sind nach Form und Größe dem Untersuchungsgut angepaßt. Das Cystoskop zur Betrachtung der kindlichen Blase durch die Harnröhre mit der Möglichkeit der Spülung und Katheterisierung hat einen Durchmesser von nur 5 mm, jedoch ein Rektoskop zur Mastdarmbetrachtung eines Erwachsenen z. B. von 18 mm.

12.4.3. Medizintechnische Anlagen

Im Gesundheitswesen sind die Umweltfaktoren, wie Klima, Luftverunreinigung, Anhäufung von Bakterien und Luftzusammensetzung, für den Behandlungsverlauf von entscheidender Bedeutung. Die Anlagen müssen den speziellen Bedingungen im Krankenhaus angepaßt sein.
Klimaanlagen werden in der Medizin vor allem in den Operations- und Intensivtherapiebereichen zur Schaffung keimarmer und behaglicher Aufenthalts- und Arbeitsbedingungen installiert (vgl. 15.9.2.). Bei Anlagen mit *Turbulenzströmung* werden Schadstoffe aufgewirbelt und unkontrollierbar abgeführt, wodurch ein hoher Restkeimgehalt der Raumluft verbleibt. Bei *Laminarströmung* strömt die Luft großflächig mit ≈ 0,4 m/s horizontal oder vertikal durch den Raum, und Schadstoffe werden ohne Wirbelbildung in der Strombahn erfaßt und abgeführt, so daß fast *keimfreie Raumluft* entsteht. Die Anlagen mit Laminarströmung sind jedoch sehr kostenaufwendig, so daß man in den Behandlungsräumen durch Kabinen sog. *Sterilzonen*, z. B. um den Operationstisch, errichtet.
Desinfektionsanlagen. *Steckbeckenspüler*. Man versteht darunter automatische Reinigungsanlagen mit Anschluß an die Abwasseranlage zur Entleerung, Spülung, Reinigung und Desinfektion mit Heißwasser von 85 °C von Steckbecken (Schieber), Urinflaschen, Nachtgeschirren usw. Der Reinigungsprozeß erfolgt unter äußerem Abschluß. Die Entnahme des Reinigungsgutes ist erst nach durchgeführter Desinfektion möglich.
Desinfektionskammer. Sie dient zur Desinfektion von größeren Geräten und Behandlungshilfsmitteln, wie Narkosegeräten, Operationstischen, Patiententransportmitteln, Krankenbetten usw. Die Desinfektionswirkung wird durch Erhitzung mit *Dampf* oder *Heißwasser*, Begasung durch *Formaldehydgas*, *Bestrahlung* mit ultraviolettem Licht oder Spülung mit *Desinfektionslösungen* erreicht. Die Desinfektionskammern sind z. T. begehbar und werden auch als Durchreichekammern zur Trennung von sauberer und unsauberer Seite hergestellt. Ihre Größe ist den zu desinfizierenden Geräten angepaßt.
Sterilisationsanlagen. Zur *Sterilisation* von Verbandstoffen, Lösungen, chirurgischen Instrumenten usw., die in keimfreiem Zustand für operative Eingriffe verwendet werden, kommen je nach der Temperaturbeständigkeit des Materials unterschiedliche Verfahren in Frage, z. B. *Heißluft* von 250 °C für Instrumente, Glas und Keramik, *Heißdampf* von 135 °C für Wäsche, Instrumente und Gummiartikel, *Äthylenoxidgas* von 50 °C für Plasterzeugnisse, *radioaktive Strahlung* für die industrielle Sterilgutproduktion. Die Sterilisationsanlagen haben ein Fassungsvermögen zwischen 20 und 1000 Litern, arbeiten meist mit Überdruck und sind als Einzelgeräte, Gerätekombinationen sowie als automatische Anlagen mit programmiertem Ablauf üblich und werden für große Versorgungsbereiche zur *Zentralsterilisation* zusammengefaßt.
Gasversorgungsanlagen. Die Entwicklung der *Atemtherapie* erfordert in zunehmendem Maße die Versorgung von Behandlungs- und Patientenräumen mit Sauerstoff zur *Inhalation* und *Beatmung*, Druckluft zur Beatmung und zum Antrieb von pneumatischen Geräten und Vakuum zum Absaugen der oberen Luftwege des Patienten. Die Versorgung erfolgt durch in Flaschen unter 15 MPa gespeicherten Drucksauerstoff oder flüssigen Sauerstoff von −183 °C und 2 MPa aus Tankanlagen, durch Drucklufterzeugungsanlagen (Kompressoren, 0,4 MPa) und durch Vakuumpumpen (80 kPa Unterdruck), welche je nach der Größe des zu versorgenden Komplexes zentral angeordnet sind und bis zu mehreren

hundert Entnahmestellen kontinuierlich versorgen.

12.4.4. Extrakorporaler Organersatz

Unter diesem Begriff werden Geräte zusammengefaßt, die außerhalb des menschlichen Körpers angeordnet sind und zeitweilig oder dauernd eine Organfunktion übernehmen.

Herz-Lungen-Maschine. Sie ersetzt während einer Herzoperation die Funktion des Herzens durch eine Blutpumpe zur Aufrechterhaltung der Blutzirkulation und der Lunge durch künstlichen Gasaustausch mit Sauerstoffanreicherung des Blutes und Kohlendioxidausscheidung, so daß am ruhiggestellten, vom Blutkreislauf getrennten Herz gearbeitet werden kann. Sterilität der Anlagenteile ist eine wichtige Voraussetzung. Meß- und Regeleinrichtungen sorgen für die Einhaltung der biologischen Bedingungen, z. B. Blutstromgeschwindigkeit, Blutmenge, Bluttemperatur, Sauerstoffgehalt, Kohlendioxidaussonderung usw.

Künstliche Niere. Bei plötzlich auftretendem und chronischem Nierenversagen übernimmt die künstliche Niere zeitweise die Nierenfunktion. Mittels einer Blutpumpe wird das vom Patienten abgeleitete Blut durch einen Dialysator gedrückt, wo es nur durch eine dünne Zellophan-Membran getrennt mit Spülflüssigkeit in Verbindung kommt und durch die Membran Giftstoffe an die Spülflüssigkeit abgibt. Die Effektivität der Dialyse wird durch Blut- und Spülflüssigkeitsanalysen überwacht. Meßeinrichtungen für Durchflußmengen, Temperatur, Druck, Patientengewicht sowie Anlagen zur Spülmittel- und Wasseraufbereitung sind erforderlich.

12.4.5. Intrakorporaler Organ- und Gewebeersatz

Hierbei handelt es sich um die Nachbildung von künstlichen Organen und Gewebe im Körperinneren mit der Funktion des zeitweiligen, wie Herzstimmulationskatheter, teilweisen, wie künstliche Herzklappen, dauernden, wie künstliche Gefäße, vollständigen, wie künstliches Herz, und kosmetischen Ersatzes, wie das künstliche Auge. Diese z. T. mechanischen und elektronischen Geräte müssen sich durch Größe, Form, Material und Funktion in hohem Maße dem menschlichen Körper anpassen und werden operativ in den Körper eingesetzt.

Herzschrittmacher, auch *Pacemaker* genannt, zur Implantation (Einpflanzung) stellen einen Steuerorganersatz dar und regen durch elektronische Impulse die Herzmuskulatur zur Arbeit an. Sie haben etwa die Größe einer Streichholzschachtel, werden durch Hochleistungsbatterien (Lithium-Zellen) gespeist und verbleiben bis zu mehreren Jahren im Körper. Nach außen sind sie durch korrosionsbeständiges Material, z. B. Titanlegierung, abgeschirmt.

Das *künstliche Herz* ist technisch gesehen eine Kombination von Herzschrittmacher als Steuerorgan und *Blutpumpe* mit Antriebsmechanismus. Besondere Probleme betreffen Materialeinsatz, Masse, Größe, Funktionssicherheit, Lebensdauer und Energieversorgung. Auf diesem Gebiet wird noch experimentell gearbeitet.

Gefäßprothesen werden als Ersatz für Luft- und Speiseröhre, Blutgefäße, Harnleiter usw. verwendet. Sie bestehen aus Kunststoffgeweben und sind in Form, Größe und Flexibilität den natürlichen Gefäßen angepaßt und werden operativ eingesetzt. Die Körperverträglichkeit spielt dabei eine besondere Rolle.

12.4.6. Atemtechnik

Hierunter werden alle technischen Hilfsmittel verstanden, die bei geschädigter Atemfunktion, wie z. B. der mechanischen Atemtätigkeit, Atemregulationsstörung, Verlegung der Luftwege, verminderter Gasaustausch in der Lunge, verminderter Sauerstofftransport des Blutes, Sauerstoffmangel in der Umgebungsluft usw., zur Unterstützung, zum Ersatz und zur Wiederherstellung der Atmung angewendet werden.

Inhalationsgeräte. *Sauerstofftherapiegeräte* werden bei ungenügender Sauerstoffversorgung eingesetzt und ermöglichen die Verabreichung von Sauerstoff über die oberen Luftwege, wie Mund, Nase, Luftröhre, die Freimachung und -haltung der Luftwege durch Sekretabsaugung und die kurzzeitige Beatmung bei Atemstörungen. Sie sind meist fahrbar und mit Druckgasbehälter für Sauerstoff, mit Druck- und Durchflußmeßgeräten, mit Anfeuchtern für das Atemgas, mit Mund-Nase-Masken und Kathetern zur Sauerstoffspende ausgestattet. Zur Verabreichung von Medikamenten werden *Aerosolgeräte* für Einzel- oder Gemeinschaftsbehandlung (Rauminhalation) verwendet. Es handelt sich um Düsen-, Schleuderrad- oder Ultraschallvernebler zur Erzeugung von künstlichen Aerosolen, d. h. in Gasen fein-dispergierte, feste oder flüssige, schwebende Teilchen.

Anaesthesiegeräte. Sie dienen zur Verabreichung von Narkosegasen in Verbindung mit Luft und Sauerstoff, damit in der Lunge die Narkosemittel feinverteilt und dosiert an das Blut abgegeben werden können (Inhalationsnarkose). Die meist fahrbaren *Anaesthesiegeräte* bestehen aus den Vorratsbehältern für die Gase, Verdunstern für flüssige Narkosemittel, dem Atemteil, einem Zirkulationssystem mit Steuerventilen, Überdruckventil und CO_2-Absorbern sowie Meß- und

Überwachungseinrichtungen für Beatmungsdruck, Gasdurchfluß, Atemvolumen und Narkosegaskonzentration. Manuelle und automatische Beatmungseinrichtungen, Absaugeeinrichtungen und Patientenanschlüsse, wie Mund-Nase-Maske und Katheter, gehören zur Geräteausstattung.

Beatmungsgeräte. *Geräte zur Atemspende*, z. B. Mundbeatmungsgeräte, bei denen der Notfallpatient über ein Schlauch- und Ventilsystem mit dem Beatmer verbunden ist, beatmen den Patienten mit der Ausatemluft des Beatmers und einem Frischluftanteil.

Geräte zur manuellen Beatmung, z. B. das Beutelbeatmungsgerät, drücken mit einem ovalen Gummiball die Luft in die Lunge des Patienten und saugen in der Ausatemphase Luft an.

Geräte zur automatischen Beatmung sind mit pneumatischem und elektrischem Antrieb ausgerüstet und werden für längere Beatmungsdauer eingesetzt.

Die Geräte zur Atemspende und manuellen Beatmung sind meist für kurzzeitige Beatmungsfälle, wie sie im Rettungswesen, in der Dringlich-Medizinischen-Hilfe und bei Not- und Zwischenfällen vorkommen, gedacht. Sie sind einfach in Aufbau und Bedienung, leicht transportabel und wenig kostenaufwendig. Die automatischen Beatmungsgeräte sind z. T. mit den Anaesthesiegeräten kombiniert, dienen zum anderen zur therapeutischen Versorgung von Patienten mit den genannten Atemstörungen. Die Geräte passen sich weitgehend den atemphysiologischen Bedingungen an, Atemvolumen, -frequenz, -verlauf und Beatmungsdruck sind einstellbar. Überwachungsgeräte zur Kontrolle von Undichtigkeiten, Druckverhältnissen, Sauerstoffanteil sowie eine 2. Antriebsmöglichkeit sind aus Sicherheitsgründen vorhanden. Die Ventilationswirkung wird durch Injektoren, Gebläse, Bälge, Atembeutel, Pumpen usw. erreicht. Die Geräte haben je nach Einsatzzweck unterschiedliche Größe, z. B. Schuhkarton- bis Schreibmaschinentischgröße.

Sauggeräte. Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Beatmung ist der freie Zugang zur Lunge. Es werden deshalb *Sekretabsaugeeinrichtungen* verwendet, die das erforderliche Vakuum von ≈ 20 kPa mittels druckgasbetriebener Injektoren oder Vakuumpumpen erzeugen. Ähnliche Geräte werden zur Operationsfeldabsaugung von Blut, Eiter, Spülflüssigkeit usw. und zur Saugdrainage, der postoperativen Trockenlegung von inneren Operationsherden, angewendet.

Atemschutzgeräte. In der Medizintechnik sind vorwiegend *Atemschutzmasken* (Mund-Nase-Masken, Gesichtsmasken) üblich, die zur Ausfilterung von Luftschwebstoffen dienen, z. B. in der Stomatologie bei Arbeiten mit der Turbine, bei starker Aerosolentwicklung und bei Operationen zum Schutz der Patienten vor Luftkeimen des Operationspersonals.

12.4.7. Medizinische Elektronik

Dieses Gebiet umfaßt alle medizinischen Geräte, Einrichtungen und Verfahren, die durch elektronische Bauelemente und Schaltungen bestimmt sind (*Biomedizintechnik*), jedoch nicht die radiologische Technik (vgl. 12.4.8.). Mit Elektromedizin wird nur die Therapie mit elektrischen Strömen und elektrischen und magnetischen Feldern bezeichnet.

Geräte zur Messung von Aktionspotentialen. Die Lebenstätigkeit von Muskel- und Nervenzellen ruft das Auftreten charakteristischer bioelektrischer Erscheinungen, die sog. *Aktionspotentiale*, hervor. Man unterscheidet bioelektrische Erscheinungen von Muskelzellen (*Elektrokardiografie*, *-myografie*, *-gastrografie*, *-uterografie*), von Nervenzellen des Gehirns (*Elektroenzephalografie*) sowie elektrische Vorgänge an der Netzhaut (*Elektroretinografie*) und die polarisierenden Gleichspannungen des Augapfels (*Elektrookulografie*).

Elektrokardiograf. Durch den Elektrokardiograf (EKG-Gerät) sollen Erregungsvorgänge in aktiven Herzmuskelzellen als elektrische Potentialdifferenzen in ihrem zeitlichen Ablauf erfaßt werden (Abb. 12.4.7-1). Der Abgriff erfolgt mit Elektroden, die sich herzfern an verschiedenen Punkten der Körperoberfläche befinden. Nach *Einthoven (Extremitätenableitung)* befindet sich eine Elektrode an jedem Arm und einem Bein, wobei 3 Ableitungen zwischen je 2 Elektroden geschrieben werden. Zur besseren Erfassung des Erregungsablaufs einzelner Herzabschnitte werden die Potentialdifferenzen zwischen 6 An-

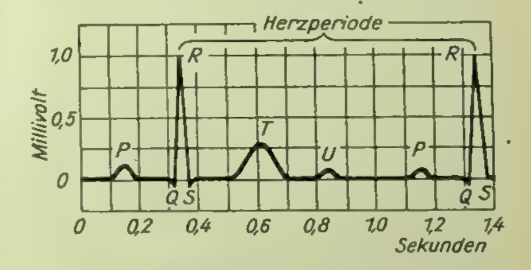




Abb. 12.4.7-1 Elektrokardiogramm (EKG) und Transistor-Elektrokardiograf

griffspunkten an der Brust und einem Sammelpunkt abgegriffen (*Brustwandableitung* nach *Wilson*). Durch die Verwendung von Differenzverstärkern werden die gegen Erde gleichphasigen Störspannungen gegenüber der gegenphasigen Nutzspannung abgeschwächt. Beim *E*lektro*k*ardiogramm (EKG) treten Spannungswerte zwischen 50 μV und 1 mV auf, die um den Faktor 10^8 bis 10^{12} verstärkt werden. Bei *Mehrkanalausführung* des EKG ist die parallele Aufnahme verschiedener Ableitungen des Blutdrucks, Herzschalls und der Herzschlag- und Pulsfrequenz möglich. Die Geräte werden für Netz- oder Batteriebetrieb (EKG am Unfallort) ausgeführt. Durch moderne elektronische Bauelemente ist die Bauausführung so klein, daß selbst 6-Kanal-Geräte transportabel sind. Die als EKG registrierte Kurve ist ein Differenzbild der getrennt ablaufenden Spannungskurven der linken und rechten Herzhälfte. Ausgewertet werden Amplitude, Vorzeichen sowie zeitliche Differenz der *P*-, *Q*-, *R*-, *S*-, *T*-, *U*-Zacken und Verlauf der elektrischen Nullinie. Eine Beziehung zwischen Höhe und Verlauf der Kurven und der Kraft bzw. Förderleistung des Herzens besteht nicht. Die wesentliche Bedeutung des EKG liegt in der Analyse von Herzrhythmus- und Herzmuskelstörungen, Durchblutungsstörungen der Herzkranzgefäße und Störungen an der für die Herzfunktion wichtigen Nervenreizleitung.

Elektroenzephalograf (EEG-Gerät). Von den Ganglienzellen des Gehirns werden ständig elektrische Impulse erzeugt, deren Summation wahrscheinlich Ursache der Kurven des *E*lektro*e*nzephalo*g*ramms (EEG) sind. Diese unterscheiden sich nach Frequenz, Spannungshöhe und Ort ihres Abgriffspunkts. Die Elektroden (meist 16 oder mehr) werden an verschiedenen, symmetrisch liegenden Stellen der Kopfschwarte des nicht geöffneten Schädels angelegt. Der Aufbau des EEG- ähnelt dem des EKG-Geräts, jedoch sind Verstärkungsgrad und Frequenzgang größer. Die EEG-Aufnahme erstreckt sich über eine Zeit von 15 bis 60 min, wobei für eine Aufnahme bis zu 80 m beschriftetes Registrierpapier anfallen kann. Die EEG-Aufnahme ist gegenüber elektrischer niederfrequenter oder hochfrequenter Störquellen sehr empfindlich. Das Gerät wird deshalb in einem abgeschirmten Raum, einem Faraday-Käfig, aufgestellt. Die Wellenformen im EEG geben Auskunft über lokalisierte, z. B. Hirntumoren, Schädel-Hirn-Traumen, allg. Funktionsstörungen, z. B. toxische Hirnschädigungen durch Arzneimittel- oder Alkoholmißbrauch, und gesteigerte Erregbarkeit der Hirnrinde, z. B. Anfallsleiden wie Epilepsie.

Telemetrie. EKG- und EEG-Meßwerte können drahtlos über einen kleinen Sender, den eine Versuchsperson trägt, zu einem registrierenden Empfänger übertragen werden. Die Telemetrie hat große Bedeutung in der Arbeits-, Sport-, Luft- und Raumfahrtmedizin.

Geräte zur Patientenüberwachung. Auf verschiedenen Stationen, z. B. *Intensivtherapie*, Chirurgie usw., ist die kontinuierliche Kontrolle von Vitalfunktionen des Patienten erforderlich. Gleichzeitig oder nacheinander werden EKG, Blutdruckwerte, Atemfrequenz, Pulsfrequenz und Körpertemperatur, z. B. durch Pulsaufnehmer, Druckwandler und Temperaturfühler, elektronisch überwacht. Die Überwachungseinheiten in modularem Aufbau zur Kombination beliebiger Meßeinschübe sind bettseitig aufgestellt. Eine wichtige Aufgabe ist die Herzrhythmuskontrolle, um frühzeitig sich anbahnende Rhythmusänderungen sowie lebensgefährliche Rhythmusstörungen durch Signalisierung frühzeitiger, verspäteter oder ausbleibender Herzaktionen und Extrasystolen zu erkennen. Weiterhin wird durch *Grenzwertmelder* bei Über- oder Unterschreitung vorgegebener Werte, wie z. B. bei Temperatur- und Druckänderungen oder Atemstillstand, Alarm ausgelöst. Eine zusätzliche Darstellung der Meßwerte und Alarmursachen erfolgt an einem zentralen Arbeitsplatz, z. B. dem Schwestern- oder Stationsarztzimmer. Da es sich um Langzeit-Analysen handelt, sind Patientenüberwachungseinrichtungen häufig mit EDVA gekoppelt (vgl. 12.4.10.).

Ultraschallgeräte. *Ultraschalltherapiegeräte*. Durch einen Hochfrequenzgenerator mit einer Frequenz von 800 bis 1000 kHz wird ein im Schallkopf befindlicher Quarz- oder Bariumtitanatkristall zu mechanischen Schwingungen angeregt (Umkehrung des piezoelektrischen Effekts, vgl. 11.5.1.). Da sehr dünne Luftschichten Schallübergänge unmöglich machen, muß ein sicherer Kontakt des Schallkopfs mit der Körperoberfläche durch eine Kopplungssubstanz, z. B. Paraffinöl, hergestellt werden. Ein Teil der Schwingungsenergie wird in Wärme umgesetzt, die besonders an Grenzflächen auftritt, da infolge des unterschiedlichen Schallwellenwiderstands Reflexion und Brechung verursacht werden. Die Hauptindikationsgebiete der Ultraschalltherapie sind Erkrankungen peripherer Nerven, z. B. Ischias, sowie chronisch-deformierende Gelenk- und Wirbelsäulenerkrankungen.

Ultraschalldiagnostikgeräte beruhen auf den spezifischen Reflexionsverhältnissen beim Schalldurchgang durch inhomogenes Gewebe. Die von der Grenzoberfläche reflektierten Impulse laufen als Echo auf den in den Sendepausen als Empfänger wirkenden Schallkopf zurück, von dem sie über einen Oszillografen in entsprechende Helligkeitswerte umgesetzt und sichtbar gemacht werden. Die Stärke des Echos ist von den akustischen Eigenschaften der Gewebearten, wie Dichte- und Schallgeschwindigkeitsunterschiede, und von der Entfernung vom Schallkopf abhängig.

Eindimensionales Ultraschall-Echoverfahren (*A-Scop-Methode*). Es handelt sich um eine Echolaufzeitmessung. Die Echos erscheinen auf einem Oszilloskop proportional der Tiefe. Die Frequenz beträgt 1 bis 10 MHz und wird der Tiefe der zu untersuchenden Gewebsschicht angepaßt.

Zweidimensionales Ultraschall-Echoverfahren (*B-Scop-Methode*). Es ist ein *Schnittbildverfahren*. Gebündelte Ultraschallimpulse dringen auf ≈ 14 cm Breite als parallele Ultraschallstrahlen in das angekoppelte Körpergewebe ein. Die Echos kehren auf demselben Weg wieder zurück und erzeugen auf dem Bildschirm einen ebenen Schnitt durch den Körper bis zu einer Gewebetiefe von 20 cm. So können anatomische Strukturverhältnisse, wie z. B. die Plazentalokalisation, Mehrlingsschwangerschaft, Tumorlokalisation, Körperquerschnitte, und funktionelle Abläufe, wie die fetale Herzaktion, hämodynamische Vorgänge am Herzen, festgestellt werden.

Audiometer dienen zur quantitativen Erfassung von Hörverlusten. Ein Tongenerator erzeugt reine Töne im Abstand ganzer (125 bis 1 000 Hz) bzw. halber Oktaven (1 000 bis 8 000 Hz) mit exakt definierter Intensität. In Abhängigkeit der Frequenz wird die Schallintensität ermittelt, die gerade noch gehört wird, und als Kurve (Audiogramm) dargestellt. Die Hörschwelle ist frequenzabhängig. Bezugswert für alle Frequenzen ist das Normalgehör jugendlicher Menschen. Über die Fähigkeit der Wahrnehmung von Sprache gibt die *Sprachaudiometrie* Auskunft. An Stelle von Tönen werden Wort- und Zahlteste verschiedener Lautstärke vom Tonband angeboten. Die Audiometrie ermöglicht auch Rückschlüsse auf den Ort der krankhaften Veränderung im Hörorgan, wenn man die Unterschiede bei wahlweiser Übertragung der Töne durch Knochen- oder Luftleitung berücksichtigt. Simulationsmöglichkeit wird durch besondere Versuchsanordnungen ausgeschaltet.

Elektronische Hörhilfen. *Hörgeräte* benötigen für eine ausreichende Wortverständlichkeit eine frequenzgetreue Übertragung zwischen 300 bis 4 000 Hz. Die Verstärkung muß unabhängig von der Größe des Eingangsschalls sein und darf die Schmerzgrenze nicht erreichen. Es besteht die Forderung nach großem Abstand zwischen Nutz- und Störpegel. Die Übertragungscharakteristik kann dem geschädigten Ohr angepaßt werden (Tief-, Mittel-, Hochton). *Taschenhörgeräte* besitzen die meisten technischen Sonderausstattungen. Nachteilig sind Reibegeräusche und allgemeine Raumgeräusche. Bei den *Miniaturhörhilfen* (Kopfgeräte), wie *Hörbrille*, *Hinter-Ohr-Gerät*, *In-dem-Ohr-Gerät*, erfolgt die Schallzuleitung über einen Hörschlauch. Die Energie liefern Knopfzellen, die bei 1,2 V Betriebsspannung eine Kapazität von ≈ 50 mAh besitzen. Durch Mikro- und Molekularelektronik wird die Qualität in Zukunft noch verbessert.

Geräte zur Reizstromtherapie (Elektrotherapie) und -diagnostik (Elektrodiagnostik). Durch elektrische *Reizströme* können Erregungen (Zuckungen) von Nerven und Muskeln ausgelöst werden. Sie werden zu therapeutischen und diagnostischen Zwecken bei verschiedenen Nerven- und Muskelkrankheiten genutzt. Angewendet werden die *Gleichstromreizung* (*Galvanisation*) mit konstantem Strom, die *Wechselstromreizung* (*Faradisation*) mit unsymmetrischen Wechselströmen und niederfrequente Wechselströme, die alle auch als Schwellstrom mit zu- und abnehmender Stromstärke verwendet werden. Bei Gleichstrom wird nur die Stromstärke, bei niederfrequentem Reizstrom die Impulsdauer, -anstiegszeit, -abfallzeit, -intensität, -frequenz eingestellt. Die Form der erzeugten Impulse variiert zwischen Rechteck, Trapez und Dreieck. Der Reizstrom wird über 2 Elektroden zugeführt. Hauptanwendungsgebiete der Reizstromtherapie sind die Behandlung schlaffer Lähmungen und Muskelatrophien, bei denen neurogen geschädigte Muskeln selektiv gereizt und vor Degeneration bewahrt bzw. atrophische Muskeln gekräftigt und geübt werden.

Elektrodiagnostik. Damit wird das Ausmaß der Nerven- und Muskelschädigungen erfaßt. Ein Maß für die Erregbarkeit ist die *Schwellenstromstärke*, bei der eine Minimalzuckung bei langer Stromflußzeit auftritt. Je kürzer die Stromflußzeit (Impulsdauer) gewählt wird, um so größer muß die Stromstärke sein, die wieder eine Zukkung auslöst.

Elektrochirurgie. *Elektrochirurgische Geräte* ermöglichen chirurgische Eingriffe mit Hilfe hochfrequenter Ströme, um biologisches Gewebe zu zertrennen (*Elektrotomie*) oder zu verkochen (*Elektrokoagulation*). Einer großflächigen und einer kleinen (0,1 bis 5 cm^2), verschieden geformten Elektrode wird vom Hochfrequenzgenerator Spannung zugeführt. An letzterer tritt eine sehr hohe Stromdichte bis 1 A/cm^2 auf, was zur Zelleiweißgerinnung (Koagulation) und zur Blutstillung oder Abtragung von Gewebsschichten führt. Schneidewirkung entsteht durch messer- oder schlingenförmige Elektrodenformen. An diesen treten besonders hohe Stromdichten auf. Zerstörte Blutgefäße werden durch die Wärmewirkung geschlossen.

Kurzwellentherapiegeräte. Die therapeutische Wirkung beruht auf der Umsetzung hochfrequenter elektrischer Energie in Wärme, womit eine wesentlich größere Erwärmung in tieferen Gewebsschichten ermöglicht wird als mit anderen *Wärmetherapieverfahren*, wie z. B. Bädern, Rotlichtbestrahlungen. Die Wärmeumsetzung erfolgt aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der Gewebe. Die Energie liefert ein mit 2 selbsterregten Leistungssendetrioden bestückter Hochfrequenzgenerator. Zur sicheren Funkent-

störung sind Frequenzbänder um 30 MHz für die Arbeitsfrequenz festgelegt. Die Durchwärmung ist von der Höhe der Stromdichte in diesem Gebiet (10 mA/cm²) abhängig. Die Applikation kann als *Kondensatorfeldmethode* erfolgen, bei der der Körper als Dielektrikum zwischen 2 flächenförmigen Glaskondensator- oder flexiblen Gummielektroden gelagert wird. Durch den Haut-Elektroden-Abstand wird die Wärmeverteilung beeinflußt. Bei der *Spulenfeldmethode* wird die elektromagnetische Induktion genutzt. Durch eine am Körper anliegende *Wirbelstromelektrode* wird das Gewebe von einem magnetischen Wechselfeld durchsetzt. Damit kann eine Erwärmung bis in ≈ 10 cm Tiefe erzielt werden. Schlecht leitende Gewebe, wie Fett- und Knochengewebe, werden im Kondensatorfeld, gut leitende Gewebe, wie Muskeln, Leber, Milz, Gehirn, Niere, im Spulenfeld gut durchwärmt. Kurzwellentherapie wird bei chronisch-rheumatischen Erkrankungen, Erkrankungen des Nervensystems, endokrinen Störungen und degenerativen Gelenkerkrankungen angewendet.

12.4.8. Radiologische Technik

Die Radiologie umfaßt die *Röntgendiagnostik*, *Strahlentherapie* und *Nuklearmedizin*. Die Röntgenstrahlung ist eine kurzwellige elektromagnetische Strahlung. Durch die Hochspannung werden die von der Glühkatode emittierten Elektronen beschleunigt und treffen gebündelt auf den Brennfleck der Anode. Dabei wird deren Bewegungsenergie in 1 % (Röntgen-) Strahlungsenergie und 99 % Wärmeenergie umgewandelt. Die Intensität der Strahlung hängt ab von der Anzahl der in der Zeiteinheit auf die Anode prallenden Elektronen (Röhrenstromstärke), dem Quadrat der Röhrenspannung sowie der Ordnungszahl des Anodenmaterials und nimmt mit dem Quadrat der Entfernung vom Fokus ab. Die Härte der Strahlung ist allein von der Röhrenspannung abhängig. In der Nuklearmedizin wird nur die durch den radioaktiven Zerfall der Atome entstehende β- und γ-Strahlung genutzt.

Geräte der Röntgendiagnostik. Bei der Durchstrahlung des Körpers treten Absorptionsunterschiede auf, die ein Durchleuchtungsbild oder eine Röntgenaufnahme erzeugen. Die dazu erforderliche *Röntgeneinrichtung* besteht aus dem *Röntgenstrahler* (Röntgenröhre und Röhrenschutzgehäuse), dem *Röntgengenerator* (Hochspannungserzeuger), dem *Durchleuchtungs-* und/oder *Aufnahmegerät*, dem *Schalttisch* zur Regelung von Stromstärke, Strahlungsdosis, Hochspannung, Belichtungszeit und Zusatzgeräten, wie *Bildverstärker*, *Röntgenfernsehen*, *Belichtungsautomatik* usw. In der Röntgendiagnostik werden *Drehanoden-Röntgenröhren* verwendet. Für große Bildschärfe ist ein möglichst kleiner Brennfleck erforderlich. Durch Rotation (2 800 bis 8 400 U/min) der Anode wird die gesamte Energie nicht nur auf dem optisch wirksamen Brennfleck umgesetzt, sondern auf einem Kreisring (effektiver Brennfleck) verteilt. So können kleinere optische Brennflecke und höhere Strahlungsleistungen erreicht werden.

Röntgenaufnahmegeräte bestehen aus einem Stativ mit dem Röntgenstrahler und dem *Lagerungstisch* für den Patienten mit der Halterung für die *Filmkassette*. Es gibt Spezialausführungen für Schädel-, Wirbelsäulen- und Schichtaufnahmen. Für Herz- und Gefäßdarstellungen bestehen Aufnahmemöglichkeiten in 2 Ebenen in Verbindung mit automatischen *Filmwechslern* für Bildfolgen bis 12 Bilder/s oder Kinokamera. Die belichteten Filme werden in *Röntgenentwicklungsautomaten* in 90 s entwickelt und fixiert.

Röntgendurchleuchtungsgeräte bestehen aus einem Kipptisch, der um 90° bis 180° aus der vertikalen Stellung geschwenkt werden kann, und dem Röntgenstrahler hinter der Lagerungsplatte, der mit dem *Zielgerät* (Filmkassette, Leuchtschirm, Bildverstärker) starr gekoppelt ist. Je nach Größe der Untersuchungsregion wird das Strahlungsbündel eingeblendet. Zur Beobachtung des Durchleuchtungsbilds wird die unsichtbare Röntgenstrahlung durch Leuchtstoffe, wie Zinkkadmiumsulfid, auf einem *Leuchtschirm* in sichtbares Licht umgesetzt. Beim *Bildverstärker* befindet sich der mit CsJ beschichtete Leuchtschirm direkt auf der Fotokatode. Die Lichtverteilung wird in eine partiell unterschiedliche Emission von Fotoelektronen umgewandelt, die durch elektrische Felder beschleunigt und durch eine Elektronenoptik auf dem Ausgangsschirm stark verkleinert abgebildet werden. Die Leuchtdichte wird dadurch um den Faktor 10^3 bis 10^4 erhöht. Das Ausgangsbild wird entweder durch *Röntgenfernsehen* auf einem Monitor dargestellt oder von einer *Einzelbildkamera* (70 mm × 70 mm, 100 mm × 100 mm) mit bis zu 2 Bildern/s aufgenommen. Die große Empfindlichkeit der Bildverstärker führt zur Senkung der Strahlenbelastung der Patienten.

Belichtungsautomaten regulieren durch Messung der Strahlungsdosis in Ionisationskammern in den bildwichtigsten Teilen die Strahlungsintensität für eine optimale Belichtung der Aufnahmen bzw. gleichbleibende Helligkeit des Durchleuchtungsbilds.

Schichtaufnahmegeräte. Bei der Schichtaufnahme (*Tomografie*) bewegen sich Röhre und – in entgegengesetzter Richtung hinter dem Patienten – Filmkassette an einem Pendelarm um einen im Objekt liegenden Drehpunkt. In der Aufnahme werden nur die Details derjenigen Schicht scharf dargestellt, die im Drehpunkt liegt; die Umgebung erscheint dagegen ver-

wischt. Ein größerer Verwischungseffekt wird erreicht, wenn der Röntgenstrahler komplizierte Kurven, z. B. Hypozykloide, durchläuft.

Computertomografie. Mit diesem Verfahren werden computerberechnete transversale (senkrecht zur Körperachse) Schnittbilder des Schädels und des Körperrumpfs hergestellt. Aus den Meßwerten zahlreicher Projektionen wird die Verteilung des Schwächungsvermögens des Gewebes, also das gewünschte Schnittbild, berechnet (Tafel 49). Durch die Rechnung werden gegenüber dem Röntgenschichtbild störende, sich überlagernde Schatten aus anderen Schichten ausgeschaltet, so daß der Kontrast so gesteigert wird, daß kleinste, mit bisherigen Methoden nicht darstellbare Unterschiede im Strahlungsschwächungsvermögen ($< 1\%$) sichtbar werden, z. B. Liquor/Hirnsubstanz, Tumor/Weichteil.

Röntgentherapiegeräte. Zur *Oberflächentherapie* werden weiche Strahlen von geringem Eindringungsvermögen aus Röhrenspannungen zwischen 10 und 60 kV benutzt.

Die *Tiefentherapie* verwendet harte Strahlen aus Röhrenspannungen bis 300 kV, Co-60-Strahlung und ultraharte Beschleunigerstrahlung mit Energien bis 50 MeV. Um dabei die Strahlenbelastung des zwangsläufig mit durchstrahlten gesunden Gewebes zu mindern, wird der Krankheitsherd nacheinander von verschiedenen Stellen der Körperoberfläche her bestrahlt (*Mehrfelder-Stehfeldbestrahlung*) oder der Strahlerkopf führt Rotations- bzw. Pendelbewegungen aus.

Beschleuniger. Sie werden zur Erzeugung ultraharter Röntgenstrahlung und Elektronen eingesetzt. In *Ringbeschleunigern* (5 bis 50 MeV) werden Elektronen durch elektrische und magnetische Felder sehr stark beschleunigt und gebündelt, so daß sie direkt zur Bestrahlung nutzbar sind. Außerdem können die beschleunigten Elektronen, ebenso wie im *Linearbeschleuniger* (2 bis 20 MeV), an einer Antikatode abgebremst werden, so daß ultraharte Röntgenstrahlen entstehen (Tafel 48). Beide energiereichen Strahlungen lassen sich aufgrund der günstigen Tiefendosisverteilung besonders gut zur Behandlung von Geschwülsten einsetzen, da sich damit eine größere Schonung des gesunden Gewebes als bei anderen Bestrahlungsmethoden erreichen läßt. Durch verschieden geformte Blenden an der Austrittsöffnung dieser Geräte wird der Strahlenkegel der Ausdehnung des Krankheitsherds angepaßt.

Telekobaltbestrahlungsgeräte (sog. „*Kobaltkanone*") dienen ebenfalls zur Bestrahlung tiefliegender Krankheitsherde und enthalten Co-60 mit einer Aktivität von $5 \cdot 10^{13}$ bis $3 \cdot 10^{14}$ Bq als Strahlungsquelle. Die radioaktive Substanz befindet sich in einem beweglichen Strahlerkopf aus Blei, Wolfram und Uran. Beschleuniger und Kobaltbestrahlungsgeräte werden in besonderen Räumen mit dicken Strahlenschutzwänden von ≈ 1 m Barytbeton aufgestellt. Der Patient wird über eine Fernsehanlage beobachtet. Co-60, Sr-90, Cs-137, Ir-192 und Au-198 mit Aktivitäten von einigen MBq, eingeschlossen in Metallkapseln, werden zur *Kontakttherapie* (Kleinraumbestrahlung) von Krankheitsherden benutzt. Die Aktivitätsträger werden in Körperhöhlen eingeführt oder in erkranktes Gewebe implantiert.

Nuklearmedizinische Geräte. ***Isotopendiagnostik.*** Durch nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren wird die Funktion eines Organs oder Organsystems durch quantitativen Nachweis der beim radioaktiven Zerfall eines vorher dem Patienten verabreichten Radionuklids, z. B. Cr-51, Fe-59, Tc-99m, In-113m, J-131, entstandenen Strahlung beurteilt (m = Isotop im metastabilen Zustand). Die Messung des zeitlichen Verlaufs der Aktivitätskonzentration in einem Körperabschnitt, z. B. Schilddrüse, Niere, Blut, Kreislaufsystem u. a., erfolgt mit Funktionsmeßplätzen. Diese *Kernstrahlungsmeßgeräte* bestehen aus Detektor (meist *Szintillationszähler*), Hochspannungserzeuger, Impulsverstärker, -höhenanalysator, -zähler, -dichtemesser. Die bildliche Darstellung der Aktivitätsverteilung zur Beurteilung von Größe, Form und Lage eines Organs erfolgt mit Hilfe eines *Szintillationsscanners.* Über dem Organ mit dem angereicherten Radionuklid wird die Aktivitätsverteilung automatisch punktweise mittels eines mäanderförmig bewegten Szintillationszählers registriert. Die Bilder werden als Farbverteilung auf Papier (Strichszintigramm) oder Schwärzungsverteilung eines Films (Fotoszintigramm) ausgegeben. Bei der *Szintillationskamera* wird ein stehendes Detektorsystem mit wesentlich größerem Kristalldurchmesser und damit möglicher Darstellung ganzer Körperabschnitte zur schnellen Erfassung der Aktivitätsverteilung eingesetzt. Die Darstellung des Bildes erfolgt auf einem Oszilloskop oder über den Schnelldrucker einer EDVA (vgl. 12.4.10.).

Isotopentherapie. Radioaktive Isotope in offener Form werden zur Behandlung von Krankheiten der Schilddrüse (J-131) und des Blutes (P-32) eingesetzt; der Strahler gelangt über den Stoffwechsel an den Wirkungsort.

12.4.9. Medizinische Labortechnik

In der speziellen medizinischen Labortechnik werden Geräte für klinisch-chemische Untersuchungen auf den Gebieten der Blutuntersuchung (z. B. Zählung von Blutkörperchen, Bestimmung von Zellengrößen, des Hämoglobingehalts sowie der Stoffzusammensetzung), der Gerinnung (z. B. Bestimmung der Blutgerinnungszeit, Faktor-Bestimmung), des Zellaufbaues (z. B. Zellzählung, Untersuchung von Gewebeflüssigkeit, Harn, Speichel usw.), der

Urinuntersuchung (z. B. pH-Wert-Bestimmung, Nachweis von Eiweiß u. a. Stoffen) u. a. angewendet.

Die *Mikro-Hämatokrit-Zentrifuge* dient zur Bestimmung des Anteils der roten Blutkörperchen in Relation zum Plasma (Hämatokrit) durch Zentrifugieren mit ≈ 12 000 U/min.

Blutgasanalysatoren werden zur Bestimmung von pH-Wert, Sauerstoff- und CO_2-Druck und der Blutsäure- und -basenanteile in kleinsten Blutmengen durch elektrochemische Analyse verwendet.

Beim *Osmometer* wird die Gefrierpunktmessung zur Bestimmung der Konzentrationen von Blut, Urin, Liquor (Hirn-Rückenmark-Flüssigkeit) usw. herangezogen.

Fotometer dienen in der Medizin zur Bestimmung von Alkalien. Beim *Flammenfotometer* wird ein Aerosol in einer Flamme verdampft und die Strahlung der aufleuchtenden Elemente gemessen. Das Gerät dient zur vollautomatischen Durchführung von Transmissions- und Extinktionsmessungen flüssiger, gasförmiger und fester Stoffe in der Biologie und Bakteriologie bei Stoffwechsel-, Fruchtwasser- und Hämoglobinuntersuchungen.

Im *Elektrophoresegerät* wird die unterschiedliche Wanderungsgeschwindigkeit von Eiweißstoffen im elektrisch durchströmten Serum oder Plasma zur analytischen Stofftrennung genutzt.

Laborautomaten stellen einen wesentlichen Faktor bei der Rationalisierung und Zentralisierung der Laboruntersuchungen dar. Entweder werden die Geräte mit Einzelfunktion aneinandergereiht (offene Bauweise) oder alle Funktionen in einer Anlage vereinigt (geschlossene Bauweise). Sie dienen vor allem in der klinischen Chemie zur Bewältigung der großen Anzahl von Untersuchungen und können stündlich bis zu mehreren 100 Proben bearbeiten und auswerten.

12.4.10. Anwendung der Rechentechnik in der Medizin

In der Medizin ist die EDV Hilfsmittel des Arztes im quantifizierbaren Bereich. Sie ermöglicht eine schnelle und gezielte Selektion und Bearbeitung großer Datenmengen. Es gibt vor allem 3 Anwendungsbereiche: 1. *Medizinische Datenbank- und Kommunikationssysteme*, 2. *Medizinische Technik*, 3. *Verwaltungsaufgaben*. Es werden in zunehmendem Maße Mehrrechner-Verbundsysteme eingesetzt. In einem übergeordneten Rechner der Datenbank findet die Datenverwaltung statt, während die eigentliche Datenverarbeitung in mehreren aufgabenorientierten Rechnern der medizinischen Technik und der Verwaltung stattfindet. Alle Patientendaten, wie z. B. Patienteninformationen, Meßwerte, Befunde, Krankenhausleistungen, sind zwischen den Rechnern austauschbar. In verschiedenen medizinisch-technischen Bereichen werden selbständige Rechnersysteme in Verbindung mit speziellen Meßgeräten eingesetzt. Die Eingabe der Patienteninformation und Meßwerte kann im *On-line-* oder im *Off-line-Betrieb* erfolgen (vgl. 14.3.). Rechner werden häufig in der Radiologie, Herz-Kreislauf-Diagnostik, Patientenüberwachung und im klinisch-chemischen Labor eingesetzt.

Medizinische Datenbank. Die *Patientenstammdaten* werden bei der Anmeldung erfaßt und nach und nach durch Meßwerte und Befunde von Stationen und Labors ergänzt. Alle Informationen können als Tagesliste oder Sammelbericht je Patient abgerufen werden. Die Aufgaben beziehen sich auf Krankenhausstatistiken, freie Bettenkapazität, Materialwirtschaft, Arzneimittelversorgung, organisatorische Aufgaben des Blutspendewesens usw.

Rechner in der Medizintechnik. *Röntgendiagnostik*. Der Rechner dient als Röntgenbild-Befundungshilfe zur *automatischen Befundungsprotokollierung* und Arztbriefausschreibung. In anderen medizinischen Fachrichtungen können nach Eingabe spezifische Informationen Operations- und Untersuchungsberichte automatisch ausgeschrieben werden.

Strahlentherapie. Nach Eingabe des Patientenumfangs und der Strahlungsenergie, Feldgröße, Bestrahlungsmethode usw. wird die Dosisverteilung der Strahlung in den Organen des bestrahlten Körperabschnitts berechnet.

Nuklearmedizin. Die Bearbeitung von Bildmatrizen des Szintillationsscanners und der -kamera steht im Vordergrund. Die Meßwerte werden durch Glättungsrechnung von ihren statistischen Schwankungen korrigiert, Untergrundstrahlungen subtrahiert und für eine quantitative Auswertung in Klassen eingeteilt. Die bildliche Darstellung jeder Klasse erfolgt als Ziffer, Graustufe oder Farbe. Aber auch Probenwechsler und Funktionsmeßplätze sind mit Rechnern verbunden, um eine schnelle Ergebnisrechnung zu ermöglichen.

Computergestützte Analyse von EKG und EEG. Die Meßwerte des EKG oder EEG werden entweder auf einem Analogmagnetband am Aufnahmeort zwischengespeichert (off-line) oder direkt dem Rechner zugeleitet (on-line). Für die quantitative Analyse wurden auf der Grundlage statistischer Bewertungen großer Untersuchungsmengen Normwerte erarbeitet und Tabellen zur zahlenmäßigen Beschreibung von Symptomen erstellt. Die Analysenprogramme sind so weit entwickelt, daß „normale" EKG mit Sicherheit erkannt werden, was vor allem für die Auswertung von Voruntersuchungen eine Rationalisierung darstellt. Im Rechner wird eine *R*-Zacken-Erkennung zur Separierung der

EKG-Zyklen vorgenommen, der repräsentative Komplex ausgewählt, eine Wellen-Identifikation durchgeführt, die Kurve nach verschiedenen Gesichtspunkten vermessen und z. T. eine Diagnose mit Wahrscheinlichkeitsangaben gestellt.

Patientenüberwachung. Auf Intensivtherapiestationen kann die gesamte Patientenüberwachung über Prozeßrechner erfolgen, indem die Meßwerte verschiedener Meßstellen (vgl. 12.4.7.) erfaßt, gespeichert, ausgewertet und ihre zeitlichen Veränderungen beurteilt werden. Klinisch-chemische Laborautomaten sind mit schnellen Prozeßrechnern gekoppelt. Die Proben werden den zugehörigen Patientenstammdaten zugeordnet, so daß nach der Erfassung, Transformation und Korrektur der Meßwerte und Beurteilung der Ergebnisse nach unteren und oberen Grenzwerten Listen mit allen erforderlichen Informationen ausgegeben werden können.

13. Meßtechnik

Meßtechnik ist angewandte Meßkunde. Sie umfaßt den Aufbau und die Eigenschaften der Meßmittel und die Methoden ihrer Anwendung.

13.1. Allgemeines über Meßtechnik und Meßgeräte

13.1.1. Gliederung der Meßtechnik

Unter den mechanischen, pneumatischen, optischen und elektrischen Meßprinzipien haben die elektrischen die größte Bedeutung erlangt. Hauptvorteile sind die Möglichkeiten der elektronischen Verstärkung und die sehr geringe Trägheit elektrischer Systeme. Deshalb ist es üblich, die Meßtechnik in die Kategorien nichtelektrisch und elektrisch zu unterteilen, so daß sich eine Gliederung entsprechend Abb. 13.1.1-1 ergibt. Hinsichtlich der Einsatzbedingungen unterscheidet man weiterhin zwischen Labor- und Betriebsmeßtechnik. Typische Bereiche der *Labormeßtechnik* sind Forschung, Entwicklung und Gütekontrolle, während die *Betriebsmeßtechnik* – als Bestandteil der MSR-Technik – den Bereich der industriellen Produktion umfaßt.

13.1.2. Grundbegriffe der Meßtechnik

Messen. Hierbei wird der Wert einer physikalischen Größe ermittelt. Messen heißt feststellen, wieviel mal eine Maßeinheit (Einheit) in der zu messenden Größe enthalten ist. Eine Messung ist also ein Vergleich mit einer Maßeinheit. Sofern der zeitliche Verlauf der Meßgröße erfaßt wird, spricht man vom *Registrieren* bzw. *Oszillografieren*.

Meßgröße ist die zu messende physikalische Größe, z. B. Länge, Temperatur, elektrische Spannung.

Meßwert ist der durch Messung ermittelte Wert. Er ergibt sich, wie jede physikalische Größe, als das Produkt aus Zahlenwert und Maßeinheit, z. B. 65 mm, 20 °C, 12 V. Bei Anteilmessungen wird der Meßwert in Prozent oder als reiner Zahlenwert angegeben.

Meßergebnis kann der Meßwert selbst sein, oder es ergibt sich, bei indirekter Messung, aus anderen Meßwerten durch Berechnung nach einer bekannten Beziehung. Es ist i. allg. fehlerbehaftet.

Prüfen oder Lehren. Hierbei wird festgestellt, ob der Wert einer physikalischen Größe in einem vorgegebenen Toleranzbereich liegt; der Wert selbst interessiert nicht. Das Prüfergebnis ist damit stets eine Ja/Nein-Entscheidung in der Form „zu klein"/„gut"/„zu groß" bzw. „gut"/„schlecht". Alle Prüfmittel sind nach diesem Prinzip konstruiert. Im weiteren Sinne umfaßt das Prüfen auch das nichtmaßliche Prüfen, die sog. Sichtprüfung. Das Prüfen stellt das Hauptprinzip der Gütekontrolle in den Betrieben dar.

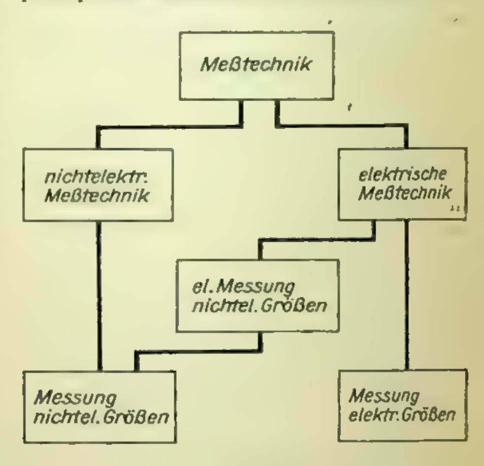


Abb. 13.1.1-1 Hauptgliederungsprinzip der Meßtechnik

Kalibrieren, Eichen, Justieren. Diese 3 Begriffe werden häufig mit „Eichen" bezeichnet, obgleich sie verschiedene Vorgänge betreffen.

Unter *Kalibrieren* eines Meßmittels versteht man das Festlegen der Teilungsmarken und später das Ermitteln der vorhandenen Fehler durch Vergleich mit einem genaueren Meßmittel. Kalibrierkurven und entsprechende Korrekturkurven und -tabellen erfassen den gesamten Meßbereich des Meßmittels.

Beim *Eichen* handelt es sich um amtliches Prüfen und Beurkunden von Meßmitteln. Durch Vergleich mit einem *Eichnormal* wird kontrolliert, ob die vorhandenen Fehler des Meßmittels innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen liegen. Eichungen werden grundsätzlich nur vom Eichamt durchgeführt.
Unter *Justieren* versteht man das Einstellen oder Abgleichen eines Meßmittels mit dem Ziel, bei nachfolgenden Messungen die angegebenen Fehlergrenzen dieses Meßmittels einzuhalten. Hierfür gibt es Justiervorschriften, die Bestandteil der Bedienungsanleitungen der Meßmittel sind.
Meßmittel ist ein Erzeugnis, das Meßzwecken dient. Meßmittel teilt man nach funktionellen Gesichtspunkten in 3 Kategorien: Maßverkörperungen, Meßgeräte und Meßwandler.
Maßverkörperung nennt man ein Meßmittel, das einen oder mehrere Werte einer physikalischen Größe gegenständlich verkörpert. Beispiele sind Maßstäbe, Wägestücke, Meßwiderstände.
Normal heißt eine Maßverkörperung oder eine Einrichtung zur Darstellung von Werten einer physikalischen Größe, wenn sie eine eichamtlich bescheinigte Genauigkeitsforderung erfüllt. Maßverkörperungen dieser Art sind die Prototypen für Länge und Masse sowie die Spannungs- und Widerstandsnormale, die als Normalelemente und Normalwiderstände bezeichnet werden. Bei zunehmender Genauigkeit unterscheidet man zwischen Gebrauchs-, Kontroll- und nationalen Normalen sowie dem internationalen Normal.
Meßgerät nennt man ein Meßmittel, das die zu messende Größe in eine Anzeige umwandelt. *Meßinstrument* ist die übliche Bezeichnung für ein elektrisches Meßgerät.
Meßwandler sind Meßmittel, die die zu messende Größe in eine andere Größe oder in einen anderen Wert derselben Größe umwandeln. Analoge Meßwandler nennt man *Meßumformer*, z. T. auch *Meßverstärker*, digitale Meßwandler *Meßumsetzer*. In der Wechselstromtechnik versteht man unter Meßwandlern speziell ausgelegte Transformatoren, die der Meßbereichserweiterung dienen.
Meßfühler oder *Geber* nennt man einen Meßwandler, der eine nichtelektrische Meßgröße in eine für die weitere Meßwertverarbeitung günstigere elektrische Größe umwandelt. An seinem Ausgang erscheint das sog. natürliche Abbildungssignal. Beispiele dafür sind elektromagnetische Geber, Dehnungsmeßstreifen, Thermoelemente.
Meßeinrichtung ist die Bezeichnung für die Gesamtheit der Meß- und Hilfsmittel, die für das Messen nach einem bestimmten Meßverfahren eingesetzt werden. Im engeren Sinne werden Geräte zur elektrischen Messung nichtelektrischer Größen und, in Automatisierungsanlagen, die Funktionseinheiten zur Informationsgewinnung als Meßeinrichtung bezeichnet.

13.1.3. Meßverfahren

Unter einem *Meßverfahren* versteht man die Art und Weise des Messens. Es umfaßt ein Meßprinzip und eine Meßmethode.
Meßprinzip ist die grundlegende physikalische Erscheinung, auf der eine Messung beruht. Die Unterscheidung von Meßprinzipien ist vor allem beim elektrischen Messen nichtelektrischer Größen von Bedeutung und betrifft in diesem Falle die Arbeitsweise des Meßfühlers.
Meßmethode heißt die der physikalisch-technischen Realisierung übergeordnete Klassifizierung einer Messung. Man unterscheidet:
a) Nach der Beziehung zum Meßergebnis direktes und indirektes Messen sowie Unterschiedsmessungen. *Direktes* oder *unmittelbares Messen* liegt vor, wenn der abgelesene Meßwert bereits das Meßergebnis ist. Dies trifft auf das Messen mit Maßverkörperungen und für alle die Meßgeräte zu, deren Skalen in Einheiten der Meßgröße geteilt sind. *Indirektes* oder *mittelbares Messen* liegt vor, wenn das Meßergebnis unter Benutzung einer bekannten Formel aus anderen Meßwerten errechnet werden muß, z. B. Messen des elektrischen Widerstands durch Strom- und Spannungsmessung nach der Beziehung $R = U/I$. Bei *Unterschieds-* oder *Vergleichsmessungen* wird das Meßergebnis aus der abgelesenen Abweichung zu einer bekannten, etwa gleichgroßen Maßverkörperung bestimmt.
b) Nach der Bildung der Anzeige die Ausschlag- und Kompensationsmethode. Bei der *Ausschlagmethode* wird die Meßgröße in eine entsprechende Anzeige umgewandelt. Bei der *Kompensationsmethode* wird die Anzeige aus einer mit Hilfsenergie erzeugten Kompensationsgröße abgeleitet, deren Wert sehr genau auf den Wert der Meßgröße eingestellt wird. Man unterscheidet Kompensatoren mit manuellem Abgleich und selbstabgleichende Kompensatoren. Letzteren liegt das Prinzip eines Folgeregelkreises zugrunde. Wichtigste Anwendungsformen der Kompensationsmethode sind die Kraft- und Weg- sowie Spannungs- und Stromkompensation.
c) Nach der Meßwertverarbeitung *analoges* und *digitales* sowie *kontinuierliches* und *diskontinuierliches Messen*. Digitale Meßgeräte und -einrichtungen besitzen mindestens ein digitales Element, die Anzeige, diskontinuierliche Meßeinrichtungen mindestens ein zeitlich diskontinuierlich arbeitendes Element.

13.1.4. Meßgeräte

Einteilungsprinzipien. Die wichtigsten Kategorien von Meßgeräten werden nach den folgenden Einteilungsprinzipien bezeichnet:

– nach der Meßgröße, z. B. als Längen, Temperatur-, Spannungsmeßgeräte;
– nach der Beweglichkeit, z. B. als tragbare sowie Einbau- oder Schalttafelmeßgeräte;
– nach der Anzahl der Meßbereiche, z. B. als Einfach- sowie Vielfach- oder Universalmeßgeräte;
– nach der Genauigkeit, z. B. als Präzisions- oder Feinmeßgeräte sowie Betriebsmeßgeräte;
– nach der physikalischen Funktion, z. B. als mechanische, elektrische, elektronische Meßgeräte;
– nach der Art des Meßwerks, z. B. als Bourdonfeder-, Ringwaage-, Drehspulmeßgeräte;
– nach der Meßwertverarbeitung, z. B. als analoge und digitale sowie kontinuierliche und diskontinuierliche Meßgeräte.

Kenngrößen der Meßgeräte. Als *Anzeigebereich* wird der gesamte Bereich der Meßwerte bezeichnet, die an der Skale abgelesen werden können. Der *Meßbereich* ist der Teil des Anzeigebereichs, für den die Genauigkeitsbedingungen der betreffenden Fehlerklasse erfüllt werden. Sofern er nicht mit dem Anzeigebereich übereinstimmt, wird er durch Punkte an den Teilstrichen der Skale gekennzeichnet.

Die *Fehlerklasse* ist der Zahlenwert für die Grundfehlergrenzen eines Meßgeräts (vgl. 13.1.5.).

Der *Skalenteil* (*Skt*) ist der Abstand zweier benachbarter Teilstriche der Skale. Die *Skalenteilgröße* ist der in Millimetern gemessene Abstand zweier benachbarter Teilstriche, z. B. 1,5 mm. Unter *Skalenwert* versteht man die einem Skalenteil entsprechende Änderung der Meßgröße, z. B. 0,5 mA.

Das Verhältnis von Anzeigeänderung und zugehöriger Meßgrößenänderung ist die *Empfindlichkeit*. Für obige Zahlenbeispiele ergibt sich eine Empfindlichkeit von 1,5 mm/0,5 mA= 3 mm/mA oder 1 Skt/0,5 mA= 2 Skt/mA.

13.5.1. Meßfehler

Fehlerarten. Jedes Meßergebnis wird durch Meßfehler verfälscht. Ursache dafür sind Unvollkommenheiten des Meßobjekts, des Meßmittels, der Meßmethode und der Beobachtung sowie Einflüsse der Umgebung. Danach lassen sich objektive und subjektive Fehler sowie innere, d. h. dem Meßmittel anhaftende, und äußere Fehler unterscheiden.

Nach ihrem Charakter unterscheidet man systematische und zufällige Fehler. *Systematische Fehler* haben einen bestimmten Betrag und ein bestimmtes Vorzeichen; sie machen das Meßergebnis *unrichtig*. Sie lassen sich meßtechnisch erfassen und durch eine Meßwertkorrektur am Meßmittel i. allg. einfach kompensieren. *Zufällige Fehler* streuen statistisch, d. h. sie schwanken nach Betrag und Vorzeichen; sie machen das Meßergebnis *unsicher*. Sie sind nicht kompensierbar und lassen sich nur durch Mittelwertbildung aus mehreren Messungen zahlenmäßig erfassen und rechnerisch eliminieren.

Fehlerkenngrößen. Fehler lassen sich grundsätzlich als absoluter, relativer oder reduzierter Fehler angeben:

$\delta_{abs} = x - x_0$ in Einheiten der Meßgröße.

$\delta_{rel} = \frac{x - x_0}{x_0}$ als Zahlenwert oder in Prozent.

$\delta_{red} = \frac{x - x_0}{x_{max} - x_{min}}$ als Zahlenwert oder in Prozent.

Darin bedeuten: δ = Fehlergröße, x = Istwert des Meßergebnisses, d. h. gemessener Wert x_0 = Sollwert des Meßergebnisses, d. h. tatsächlicher Wert der Meßgröße, x_{max}, x_{min} = obere und untere Meßbereichsgrenze des Meßmittels.

Grundfehler. Im Grundfehler werden die nichtkorrigierbaren systematischen und die zufälligen Fehler des Meßmittels und der Meßmethode sowie die zufälligen Umgebungseinflüsse zusammengefaßt. Er wird bei Prüfbedingungen, d. h. beim Nennwert der Einflußgrößen, so z. B. bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C, ermittelt. Der Grundfehler stellt die größte Abweichung vom Sollwert im jeweiligen Meßbereich dar und wird vorzeichenbehaftet angegeben, z. B. – 88 mV oder – 1,1 %. Unter den *Grundfehlergrenzen* versteht man die vom Hersteller für alle Exemplare eines Typs garantierten Grenzwerte des Grundfehlers. Dabei werden für positive und negative Abweichungen gleiche Grenzwerte vorgegeben, z. B. ± 100 mV oder ± 1,25 %.

Fehlerklasse. Unter der Fehlerklasse, auch *Genauigkeitsklasse* oder *Klassengenauigkeit* genannt, versteht man den vorzeichenlosen Zahlenwert für die reduzierten Grundfehlergrenzen. So bedeutet die Fehlerklasse 1,5, daß der auf den Meßbereich bezogene reduzierte Fehler des Meßmittels max. ± 1,5 % betragen darf. Dabei wird bevorzugt eine Stufung nach einer der beiden folgenden Auswahlreihen verwendet:
(1; 1,5; 2; 2,5; 5) · 10^n,
(1; 1,6; 2,5; 4; 6) · 10^n.
Präzisionsmeßgeräte haben Fehlerklassen ≦ 0,6, während Betriebsmeßgeräte die Fehlerklassen ≧ 1,0 aufweisen.

Zusatzfehler. In den Zusatzfehlern werden die Einflüsse der Umgebung, soweit sie systematische Fehler ergeben, erfaßt. Der für die jeweilige Einflußgröße gültige Zusatzfehler wird ermittelt, indem nur diese eine Einflußgröße von den Prüfbedingungen abweichend in den für sie zugelassenen Einsatzgrenzen verändert wird. Für einen bestimmten, durch Standards festgelegten Änderungsbetrag der Einflußgröße,

z. B. 10°C, wird in diesem Bereich der größte Einfluß auf das Meßergebnis ermittelt. Zusatzfehler werden als reduzierter Fehler angegeben und im Sinne von Fehlergrenzen verwendet, z. B. ±0,25%/10°C.

13.1.6. Nichtelektrische Meßtechnik

Besondere Bedeutung kommt der nichtelektrischen Meßtechnik bei der Messung folgender Größen zu:
– Länge und daraus abgeleitete Größen, vor allem Maße von Werkstücken, Gewinde- und Zahnradmaße, Meßgrößen der Landvermessung,
– Kraft und daraus abgeleitete Größen, vor allem Gewicht und Druck,
– Temperatur,
– Zeit.

Nach der Art des Meßmittels läßt sich die nichtelektrische Meßtechnik in 2 Komplexe unterteilen. Der erste betrifft das *Messen mit nichtelektrischen Maßverkörperungen*, sofern auch ein nichtelektrisches Vergleichsprinzip angewendet wird. Hierzu gehören Längen- und Winkelmessungen mit direktem Anlegen eines Strichmaßes an das Meßobjekt und die Gewichtsbestimmung mit Wägestücken und Hebelwaage.

Der zweite Komplex umfaßt das *Messen mit nichtelektrischen Meßgeräten*. In solchen Meßgeräten wird die Meßgröße nichtelektrisch in eine Länge in Form einer Anzeige umgeformt (Tab. 13.1.6-1).

Bei den Meßgeräten für Kraft und Druck, Drehzahl, Temperatur, Luftfeuchte und Ereignisse beruht die Umwandlung in eine Längenänderung auf einer physikalischen Wirkung dieser Größen. In der Längenmeßtechnik gilt dies nur für Meßuhren; bei den übrigen Längenmeßgeräten ergibt sich die Wandlung durch manuelles Verstellen von Antast- oder Anvisiereinrichtungen. Bei der Zeitmessung wird die Umwandlung der Zeit in eine Längenänderung, hier ein periodischer Umlauf, durch ein Triebsystem bewirkt, dessen Geschwindigkeit durch ein schwingendes Element konstant gehalten wird.

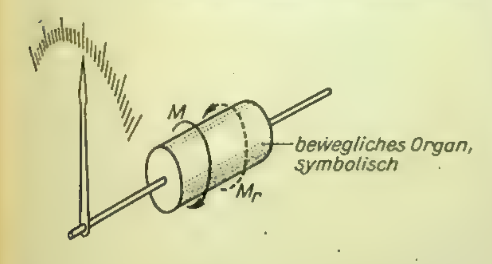


Abb. 13.1.7-1 *Prinzip der Drehmomentenwaage*

Tab. 13.1.6-1 *Wichtige nichtelektrische Meßgeräte*

Meßgröße	nichtelektrisches Meßgerät
Länge	Meßschieber, Meßuhr
Kraft	Federwaage
Druck	Manometer
Drehzahl	Fliehkrafttachometer
Temperatur	Flüssigkeitsthermometer
Luftfeuchte	Haarhygrometer
Zeit	mechanische Uhr
Ereignisse	Rollenzählwerk

13.1.7. Elektrische Meßgeräte mit Meßwerkfunktion

Elektrische Meßgeräte, auch Meßinstrumente genannt, bestehen in ihrer einfachsten Form aus Meßwerk, Beschaltung und Gehäuse. Dabei versteht man unter dem *Meßwerk* ein elektromechanisches System, das die Umformung einer elektrischen Größe in eine Anzeige realisiert. Die *Beschaltung* besteht aus elektrischen Schaltelementen und dient der elektrischen Anpassung oder Meßwertumformung. Zugehörige, aber baulich vom Meßgerät getrennte Einrichtungen werden als *Zubehör* bezeichnet.

Prinzip der Drehmomentenwaage. Die meisten elektrischen Meßwerke beruhen auf dem Prinzip der Drehmomentenwaage (Abb. 13.1.7-1). Einem durch Strom oder Spannung erzeugten Drehmoment M wirkt ein rückstellendes Drehmoment M_r entgegen, das in Abhängigkeit vom Ausschlagwinkel zunimmt. Nach Ablauf des Einstellvorgangs mit $M > M_r$ stellt sich das Gleichgewicht mit $M = M_r$ und damit die sog. statische Anzeige ein. Als Rückstellorgan dienen bei den meisten Meßwerken Spiralfedern. Viele Meßwerke sind mit Bremseinrichtungen, sog. Dämpfungen, ausgerüstet, die den Einstellvorgang „beruhigen". Außer Luftkammerdämpfungen werden bevorzugt Wirbelstromdämpfungen verwendet, die aus einem Aluminiumsegment und einem Dauermagneten bestehen. Um die Lagerreibung möglichst gering zu halten, werden vornehmlich Spitzenlager eingebaut. Das Justieren der Zeigernullstellung geschieht über einen mit einem Schraubenschlitz versehenen Exzenter, der über einen Hebel auf eine der Spiralfedern wirkt. Extrem hohe Empfindlichkeit erreicht man durch Spannbandlagerung oder Bandaufhängung. Die auf Torsion beanspruchten sehr dünnen Metallbänder liefern hier gleichzeitig das Rückstellmoment. Beim *Spiegel-* oder *Lichtmarkengalvanometer* wird statt des Zeigers ein kleiner Spiegel verwendet, der einen Lichtstrahl ablenkt. Dieser Lichtstrahl, der sog. *Lichtzeiger*, wird mehrfach reflektiert, so daß die Empfindlichkeit nochmals beträchtlich erhöht wird.

Meßwerktypen. Die größte Bedeutung haben das Drehspul-, Dreheisen- und elektrodynamische

Meßwerk erlangt. Weitere Anwendungen des Prinzips der Drehmomentenwaage sind das Induktions- und das elektrostatische Meßwerk sowie einige Quotientenmeßwerke.

Drehspulmeßwerke messen den arithmetischen Mittelwert des Stroms. In einem schmalen zylindrischen Luftspalt zwischen den Polen eines Dauermagneten und einem weichmagnetischen Kern befindet sich eine drehbar gelagerte Spule, die von dem Meßstrom durchflossen wird (Abb. 13.1.7-2). Die Zuführung des Stroms erfolgt über die beiden Rückstellfedern. Die Kraftwirkung beruht auf dem elektromotorischen Prinzip (vgl. 11.1.2.). Dieser Meßwerktyp arbeitet mit der höchsten Empfindlichkeit und Genauigkeit.

Dreheisenmeßwerke messen den Effektivwert des Stroms (vgl. 11.1.4.). In einer vom Meßstrom durchflossenen Rundspule stehen sich 2 weichmagnetische Kernteile gegenüber; ein Teil ist am Spulenkörper befestigt, das andere mit der drehbaren Achse verbunden (Abb. 13.1.7-3). Die Kraftwirkung entsteht durch Abstoßung infolge gleichsinniger Magnetisierung. Bei konstanter Breite der Weicheisenteile sind Drehmoment und Ausschlagwinkel proportional dem Quadrat der Stromstärke; bei entsprechender Formgebung sind linearisierte Skalenteilungen möglich.

Elektrodynamische Meßwerke messen das Produkt zweier Ströme. Ihre Kraftwirkung beruht auf dem elektromotorischen Prinzip (vgl. 11.1.2.).

Das *eisengeschlossene Meßwerk* ähnelt dem Drehspulmeßwerk, hat aber statt des Dauermagneten ein elektromagnetisches System, dessen Spulen ebenfalls von einem Meßstrom durchflossen werden (Abb. 13.1.7-4).

Das *eisenlose Meßwerk* hat bei prinzipiell gleicher Anordnung nur Luftspulen und im Gegensatz zum eisengeschlossenen Meßwerk eine gemeinsame Skale für Gleich- und Wechselstrom. Die Empfindlichkeit ist wesentlich geringer. Eine Variante des eisenlosen Meßwerks ist das *astatische Meßwerk*. Es hat 2 übereinander angeordnete und mit entgegengesetzten Stromrichtungen betriebene eisenlose Meßwerke, so daß der Einfluß magnetischer Fremdfelder im Meßwerk kompensiert wird.

Induktionsmeßwerke sind multiplizierende Meßwerke nach dem Ferraris-Prinzip in Trommel- oder Scheibenausführung. Als Meßwerk mit statischer Anzeige heute durch elektrodynamische Meßwerke verdrängt, die weniger frequenz- und temperaturabhängig sind. Als integrierendes Meßwerk wird das Scheiben-Induktionsmeßwerk im Wechselstromzähler verwendet.

Elektrostatische Meßwerke messen den Effektivwert der Spannung. Das *Multizellularmeßwerk* ähnelt einem Drehkondensator, wobei die Meßspannung an einen feststehenden und einen

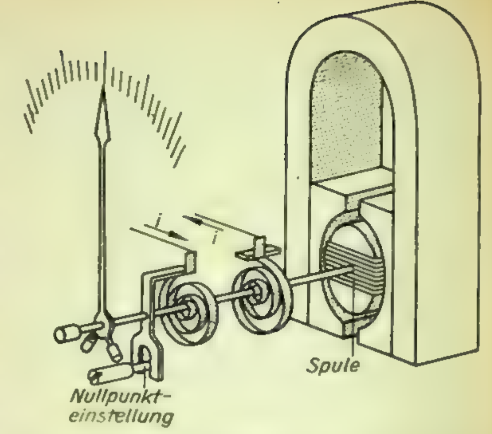


Abb. 13.1.7-2 Drehspulmeßwerk (Außenmagnetausführung)

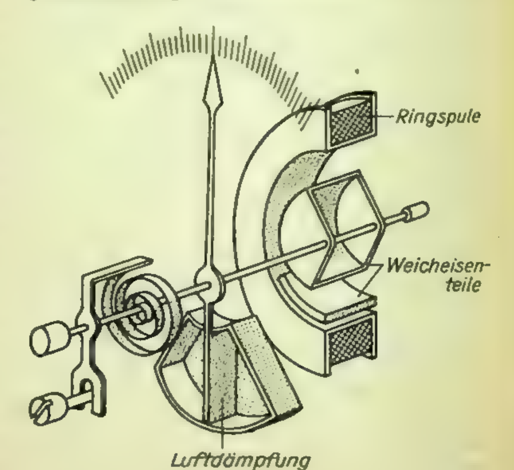


Abb. 13.1.7-3 Dreheisenmeßwerk (Rundspultyp)

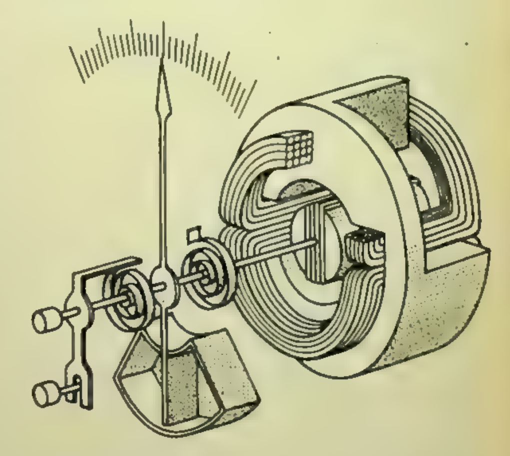


Abb. 13.1.7-4 Elektrodynamisches Meßwerk (eisengeschlossen)

drehbar gelagerten Plattensatz angeschlossen ist. Die Kraftwirkung beruht auf der Anziehung der entgegengesetzt geladenen Platten entsprechend dem Coulombschen Gesetz.
Quotientenmeßwerke messen den Quotienten zweier Ströme. Quotientenmeßwerke, die nach dem Prinzip der Drehmomentenwaage arbeiten (vgl. Abb. 13.1.7-1), sind aus dem Drehspul-, Dreheisen-, elektrodynamischen und Induktionsmeßwerk entwickelt worden. Gemeinsames Merkmal ist das Fehlen von Rückstellfedern; das rückstellende Drehmoment wird von einem der beiden Meßströme erzeugt. Die größte Bedeutung hat das *Kreuzspulmeßwerk* erlangt. Es ähnelt dem Drehspulmeßwerk, hat aber eine veränderliche Luftspaltbreite und 2 gekreuzte, miteinander verbundene Spulen, die von verschiedenen Meßströmen durchflossen werden. Die Stromzuführung erfolgt über richtkraftfreie Metallbänder. Die Kraftwirkung beruht auf dem elektromotorischen Prinzip (vgl. 11.1.2.), wobei die Drehmomente der beiden Ströme entgegengesetzt gerichtet sind. Das Spulensystem wird so ausgelenkt, daß sich die wirksame magnetische Flußdichte für den kleineren Strom vergrößert und gleichzeitig für den größeren verringert; entsprechend verändern sich die Drehmomente bis zur Gleichgewichtslage. Nach dem gleichen Prinzip arbeitet das elektrodynamische Kreuzspulmeßwerk. An die Stelle des Dauermagneten tritt hier ein elektromagnetisches System, das von einem Hilfsstrom erzeugt wird und die Phasenlage für die Quotientenbildung vorgibt.
Andere Meßwerktypen. Eine zweite Gruppe von Meßwerken beruht darauf, daß das vom Strom erzeugte Drehmoment nur während des Einstellvorgangs wirksam ist und beim Erreichen des zugehörigen Ausschlagwinkels zu Null wird. Deshalb besitzen solche Meßwerke keine mechanischen oder elektrischen Rückstellkräfte. In diese Gruppe gehören das Drehmagnet-, Hitzdraht- und Bimetallmeßwerk sowie weitere Quotientenmeßwerke. Gänzlich abweichend in Aufbau und Funktion ist das Vibrationsmeßwerk.
Drehmagnetmeßwerke messen den arithmetischen Mittelwert des Stroms. In einer feststehenden, vom Meßstrom durchflossenen Spule befindet sich ein drehbar gelagerter, in radialer Richtung magnetisierter scheibenförmiger Magnet; ein gegen das Spulenfeld räumlich versetzter Richtmagnet bestimmt die Nullage. Der Drehmagnet stellt sich auf die Resultierende zwischen dem Feld des Richtmagneten und dem der stromdurchflossenen Spule ein.
Hitzdrahtmeßwerke als Effektivwertmesser bis ≈ 1 MHz wurden durch Dreheisen- und Drehspulmeßwerke mit Thermoumformer verdrängt, die überlastungsfähiger und genauer sind.
Bimetallmeßwerke messen den Effektivwert des Stroms. Die Meßwerkachse ist mit einer vom Meßstrom durchflossenen Bimetallspirale und einem richtkraftfreien Metallband als zweiter Stromzuführung verbunden. Eine zweite, gegenläufig gewickelte und durch eine Isolierscheibe von der stromabhängigen Spirale thermisch getrennte Bimetallfeder kompensiert den Einfluß von Schwankungen der Raumtemperatur, und bestimmt die Nullage. Die Bimetallfeder dehnt sich entsprechend der in ihr auftretenden Verlustleistung $I^2 \cdot R$ und der damit verbundenen Temperaturerhöhung. Wegen der thermischen Verzögerung zeigt das Meßwerk langfristige Mittelwerte an.
Quotientenmeßwerke, die nach dem Prinzip des flüchtigen Drehmoments arbeiten, sind aus dem Dreheisen-, elektrodynamischen und Drehmagnetmeßwerk entwickelt worden. Die größte Bedeutung hat das *Kreuzfeldmeßwerk* erlangt. Beim *elektrodynamischen Kreuzfeldmeßwerk* befindet sich in einem schmalen zylindrischen Luftspalt zwischen den 4 Innenpolen eines weichmagnetischen Eisenmantels und einem Kern eine drehbar gelagerte Spule. Je 2 gegenüberliegende Spulen sind in Reihe geschaltet und werden von einem Meßstrom durchflossen. Die Drehspule wird von einem Hilfsstrom erregt, der die Phasenlage für die Quotientenbildung vorgibt. Die Kraftwirkung beruht auf der Änderung der in den gekreuzten Spulen wirksamen Flußdichte (vgl. Kreuzspulmeßwerk).
Vibrationsmeßwerke messen die Frequenz des Wechselstroms. Der *Zungenfrequenzmesser* hat mehrere, in einer Reihe nebeneinander angeordnete, vom Meßstrom durchflossene Spulen, in deren langgestrecktem Magnetfeld sich eine Reihe von Stahlzungen befindet, deren Eigenfrequenz in konstanten Stufungen zunimmt. Die Zunge, deren Eigenfrequenz mit der zu messenden Frequenz übereinstimmt, gerät in Resonanz, benachbarte Zungen schwingen mit kleinerer Amplitude mit. Er wird zur Kontrolle gebräuchlicher Frequenzen, wie 50 Hz und 500 Hz, angewendet.
Beschaltung der Meßwerke. Durch die Beschaltung werden die Meßwerke auf eine bestimmte Anwendung zugeschnitten sowie die Art der Meßgröße und der Meßbereich festgelegt. Die Beschaltung ist ein elektrisches Netzwerk, welches das Meßwerk mit den Meßklemmen des Gehäuses verbindet. Schaltelemente sind Widerstände, Gleichrichter oder Thermoumformer. Durch niederohmige *Parallelwiderstände*, sog. Shunts, werden Meßwerke zu Strommeßgeräten mit erweitertem Meßbereich, durch hochohmige *Vorwiderstände* zu Spannungsmeßgeräten. Nach dem gleichen Prinzip können die Meßkreise strommessender Quotienten- und produktbildender Meßwerke als Strom- und Spannungspfade ausgelegt werden, so daß Widerstands- und Leistungsmeßgeräte entstehen.
Für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen nutzt man die Vorteile der Drehspulmeß-

werke, indem man sie durch *Gleichrichter*, vorzugsweise Halbleiterdioden (vgl. 11.5.3.), ergänzt. Die Skalenteilung erfolgt in Effektivwerten sinusförmiger Meßgrößen, so daß es bei abweichenden Kurvenformen zu Fehlanzeigen kommt.
Auch für Effektivwertmessungen bei Strömen und Spannungen beliebiger Kurvenform setzt man vorzugsweise das Drehspulmeßwerk ein. Als Beschaltung werden hier *Thermoumformer* verwendet. Diese bestehen aus Heizdraht und Thermoelement, die in einem kleinen evakuierten Glaskolben eingeschmolzen sind. Das Thermoelement kann mit dem Heizdraht verbunden oder isoliert angebracht sein. Die Grenzfrequenz liegt bei ≈ 100 kHz.
Symbole, Skalenaufschriften. Für alle Meßwerktypen, für die Beschaltung mit Gleichrichtern oder Thermoumformern, für Stromart, Prüfspannung, Gebrauchslage, Genauigkeitsklasse und sonstige Hinweise wurden standardisierte Symbole festgelegt, die als Skalenaufschriften für elektrische Meßgeräte vorgeschrieben sind.
Zubehör. Getrennte Einrichtungen, die zur Durchführung der Messung mit dem Meßgerät verbunden bzw. mit ihm zusammen installiert werden müssen, bezeichnet man als Zubehör. Dies können separate Parallel- oder Vorwiderstände, Induktivitäten, Kondensatoren, Strom- oder Spannungswandler, Gleichrichter, Thermoumformer oder besondere Verbindungsleitungen sein.
Strom- und *Spannungswandler* dienen der Anpassung an hohe Stromstärken und Spannungen bei Wechselstrom. Es handelt sich um speziell ausgelegte Transformatoren mit folgenden Eigenschaften:
– Stromwandler werden nahezu im Kurzschluß betrieben, angeschlossene Strommesser in Reihe geschaltet;
– Spannungswandler werden nahezu im Leerlauf betrieben, angeschlossene Spannungsmesser parallel geschaltet.
Der Sekundärstromkreis von Stromwandlern darf nicht unterbrochen werden! Bevorzugte Nennwerte der Ausgangsgrößen sind 5 A; 1 A und 100 V bzw. 100 V/√3.
Elektrizitätszähler sind integrierende Meßwerke zur Ermittlung der elektrischen Arbeit. Man unterscheidet *Kilowatt-* und *Wattstundenzähler*, die das Produkt aus Wirkleistung und Zeit summieren, und *Amperestundenzähler*, die bei konstanter Spannung das Produkt aus Stromstärke und Zeit summieren,
Meßgröße ist im ersten Fall die elektrische Arbeit direkt, im zweiten Fall die Elektrizitätsmenge.
***Gleichstromzähler*.** Die größte Bedeutung hat der *Elektrolytzähler*, ein Amperestundenzähler, der aus einem allseitig geschlossenen Glasgefäß mit einem Elektrolyten und eingeschmolzenen Elektroden besteht. Nach dem Faradayschen Gesetz ist die bei Elektrolyse abgeschiedene Stoffmenge der Elektrizitätsmenge proportional, so daß der Meßzylinder in Kilowattstunden graduiert werden kann. Nach der Art der abgeschiedenen Substanz unterscheidet man Quecksilber- und Wasserstoffzähler. Weiterhin sind *Motorzähler* als Amperestunden- und Wattstundenzähler entwickelt worden, die als typische Bauteile eine Aluminiumbremsscheibe und einen Bremsmagneten enthalten.
***Wechselstromzähler*.** Zur Messung der elektrischen Arbeit in Wechsel- und Drehstromnetzen werden *Induktionszähler* verwendet. Abb. 13.1.7-5 zeigt Aufbau und Schaltung. Die 2 elektromagnetischen Systeme, das „Stromeisen" und das „Spannungseisen", und ein Bremsmagnet wirken auf eine drehbar gelagerte Aluminiumscheibe, die mit einem Rollenzählwerk verbunden ist. Zwischen den Strömen im Strom- und im Spannungseisen herrscht eine Phasenverschiebung von 90°, so daß die 3 Magnetpole ein Wanderfeld hervorrufen. Die in der Scheibe entstehenden Wirbelströme erzeugen ein antreibendes Drehmoment $M = K_1 UI\cos\varphi$. Diesem Moment wirkt der Bremsmagnet mit $M_B = K_2 n$ entgegen, so daß die Drehzahl proportional der Wirkleistung wird, $n = K_3\, UI\cos\varphi$. Die zeitliche Integration erfolgt über das Rollenzählwerk. Durch geringfügige Änderungen im Aufbau lassen sich die Induktionszähler auch für die Messung des Blindleistungsverbrauchs modifizieren.

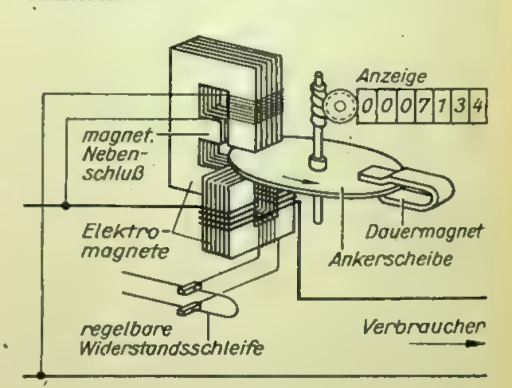


Abb. 13.1.7-5 Induktionszähler

13.1.8. Komplexe elektrische Meßgeräte

Vielfachmeßgeräte bestehen aus einem Drehspulmeßwerk und einer Beschaltung mit Gleichrichtern, Parallel- und Vorwiderständen sowie Meßbereichsschaltern, so daß sich eine Vielzahl von Strom- und Spannungsmeßbereichen für Gleich- und Wechselstrom ergibt. Zusätzlich sind sie z. T. für die Messung von Gleichstromwider-

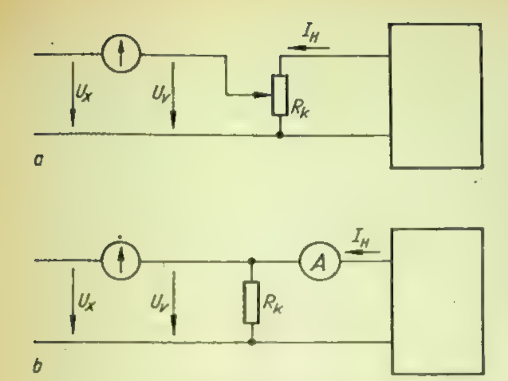


Abb. 13.1.8-1 Gleichspannungskompensatoren: a Potentiometerverfahren, b Strommeßverfahren

ständen und Kapazitäten nach dem Prinzip des Drehspul-Ohmmeters ausgelegt.

Kompensatoren sind Meßgeräte bzw. -schaltungen nach dem *Nullverfahren*. Beim Meßvorgang wird die Wirkung der zu ermittelnden Meßgröße durch die gleichzeitige Wirkung einer bekannten Größe oder Größenbeziehung verglichen und die Differenz zu Null gemacht. Als Nullindikator werden Galvanometer verwendet. Kompensatoren werden für sehr genaue Spannungs- und Strommessungen eingesetzt. Ihr besonderer Vorteil liegt darin, daß sie das Meßobjekt im abgeglichenen Zustand nicht belasten.

Gleichspannungskompensatoren beruhen auf dem Vergleich der zu messenden Spannung mit einer Spannung $I_H R_K$, die sich als Spannungsabfall eines Hilfsstroms an einem Kompensationswiderstand ergibt. Beim *Potentiometerverfahren*, Kompensator nach *Poggendorf*, wird bei konstantem Hilfsstrom der Kompensationswiderstand verändert (Abb. 13.1.8-1a). Zum Abgleich des Hilfsstroms, ebenfalls nach dem Kompensationsverfahren, wird die Umschaltung auf die Spannung eines Normalelements benutzt. Beim *Strommeßverfahren*, Kompensator nach *Lindeck* und *Rothe* wird bei konstantem Kompensationswiderstand der Hilfsstrom verändert (Abb. 13.1.8-1b). Für die Anzeige des Hilfsstroms ist ein zweites Meßwerk erforderlich.

Wechselspannungskompensatoren arbeiten nach dem gleichen Prinzip, wobei die Kompensationsspannung auch in ihrer Phasenlage einstellbar ist. Stromkompensatoren sind in den meisten Fällen abgewandelte Spannungskompensatoren.

Selbstabgleichende Kompensatoren verwenden statt des Nullindikators einen Meßverstärker, der über einen Stellmotor auf die Verstellung der Kompensationsspannung wirkt.

Meßbrücken sind Meßgeräte oder -schaltungen, die der Messung von Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten dienen. Darüber hinaus sind sie zur Messung nichtelektrischer Größen geeignet, die sich in Widerstandsänderungen umformen lassen, wie z. B. Temperatur, Feuchte und Druck. Meßbrücken sind Zusammenschaltungen von Widerständen zu einem Viereck, wobei über eine Diagonale die Hilfsenergie zugeführt wird und die andere Diagonale den Brückenausgang darstellt. An dieser Stelle werden nur Meßbrücken nach dem *Nullverfahren* (s. o.) beschrieben.

Gleichstrom-Meßbrücken werden mit Gleichspannung gespeist und zur Messung von Gleichstromwiderständen verwendet. Der wichtigste Vertreter dieser Art ist die *Wheatstone Brücke* (Abb. 13.1.8-2). Für den Nullabgleich gilt $R_X/R_N = R_1/R_2$. Daraus erhält man für den zu bestimmenden Wiederstand R_X die Beziehung $R_X = (R_1/R_2) \cdot R_N$.

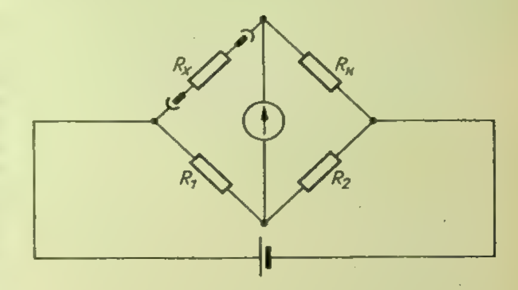


Abb. 13.1.8-2 Wheatstone-Brücke

Stufenwiderstandsmeßbrücke. R_1 und R_2 sind dezimal gestuft und bestimmen den Meßbereich. R_N ist in mehreren Dekaden gestuft und für den Nullabgleich zu betätigen.

Schleifdrahtmeßbrücke. R_N ist dezimal gestuft und bestimmt den Meßbereich. R_1 und R_2 sind als homogener Widerstandsdraht gleichbleibender Länge ausgelegt, wobei ein Schleifkontakt zum Galvanometer führt und für den Nullabgleich zu betätigen ist.

Von Bedeutung ist weiterhin die *Thomson-Brücke*, die das Messen kleiner Widerstände bis zur Größenordnung von $10^{-6}\,\Omega$ ermöglicht.

Wechselstrom-Meßbrücken werden mit Wechselspannung gespeist und zur Messung von Wechselstromwiderständen, Induktivitäten oder Kapazitäten verwendet. Basis ist das Prinzip der Wheatstone-Brücke, wobei zusätzlich die Beeinflussung der Phasenlage berücksichtigt wird. Je nach Ausführung werden Frequenzen im Mittel- oder Hochfrequenzbereich verwendet.

Elektronische Meßgeräte ergänzen die elektrischen Meßgeräte überall dort, wo besonders hohe Anforderungen an Empfindlichkeit, Genauigkeit oder Schnelligkeit der Messung gestellt werden. Typische Bauelemente sind Halbleiter bzw. integrierte Schaltungen, während Elektronenröhren nur noch für Spezialaufgaben eingesetzt werden.

Elektronische Meßgeräte können folgende typische Baugruppen enthalten, die auch als separate Geräte ausgeführt sein können:
Meßverstärker für Gleich- oder Wechselspannung, zur Verstärkung kleiner Spannungen oder Ströme oder zur Realisierung eines hohen Eingangswiderstands;
Meßgeneratoren, vor allem Sinus- und Rechteckwellengeneratoren, zur Erzeugung von Hilfsspannungen für besondere elektronische Meßverfahren;
Konstantspannungs- oder *Konstantstromquellen*, eventuell gleichzeitig Netzteil, zur belastungsunabhängigen Stromversorgung oder Einspeisung von Hilfsspannungen;
Anzeigegerät, meist Drehspulgerät, eventuell Elektronenstrahlröhre, für die Meßwertanzeige oder Anzeige des zeitlichen Verlaufs;
Netzteil für die Umwandlung von Netzwechselspannung in die für die Baugruppen des Meßgeräts benötigten Gleich- und Wechselspannungen.
Die wichtigsten elektronischen Meßgeräte sind Gleich- und Wechselspannungsmesser, z. B. Röhren- und Digitalvoltmeter, der Elektronenstrahloszillograf und elektronische Zählgeräte. Weiterhin gibt es elektronische Frequenz- und Phasenmesser.
Registrierende Meßgeräte dienen zum Aufzeichnen zeitabhängiger, periodischer und nichtperiodischer Meßgrößenänderungen. Dazu besitzen solche Meßgeräte einen besonders geformten und mit einer Schreibvorrichtung ausgerüsteten Meßwerkzeiger, Registrierpapier und einen Mechanismus für den Papiervorschub. Nach der Art der Aufzeichnung unterscheidet man *Linienschreiber*, dazu gehören Tinten-, Schneid- und Lichtlinienschreiber, und *Punktschreiber*, dazu zählen Fallbügel- und Funkenschreiber. Schneidschreiber verwenden Wachs- oder Metallpapier, Lichtlinienschreiber lichtempfindliches Fotopapier. Nach dem Papierformat unterscheidet man Bandschreiber und Kreisblattschreiber, nach der Anzahl der erfaßten Meßgrößen Einfach- und Mehrfachschreiber. *Mehrfach-Linienschreiber* haben mehrere Meßwerke, die mit ihren Schreibvorrichtungen nebeneinander angeordnet sind, während *Mehrfach-Punktschreiber* einen Meßstellenumschalter besitzen, der zusammen mit dem Farbband periodisch umgeschaltet wird.
Die höchste Genauigkeit und kurze Einstellzeiten erreicht man mit dem *Kompensationsschreiber*, dem sog. Kompensografen. Bei ihm wird das Schreiborgan mit großer Zugkraft parallel zur Skale verstellt.
Oszillografen dienen zu Beobachtung und Registrierung sehr schnell ablaufender, meist periodischer Meßgrößenänderungen. Die Kurven werden mit Licht oder Elektronenstrahl aufgezeichnet.
Lichtstrahloszillograf. Meßwertanzeige und Registrierung erfolgen auf optischem Wege. Lichtstrahloszillografen arbeiten mit besonders trägheitsarmen Meßwerken, sog. Spulenschwingern oder Stiftgalvanometern. Das sind Meßwerke nach dem Drehspulprinzip mit Spannbandlagerung und Miniaturspiegel. Der Lichtzeiger wird vom Meßwerk aus einmal über einen Polygonspiegel auf eine Mattscheibe und zum anderen auf lichtempfindliches Registrierpapier gelenkt. Durch variierbare Drehzahl des Polygonspiegels erhält man für periodische Vorgänge ein stehendes Bild auf der Mattscheibe. Die Ausrüstung erfolgt mit bis zu 12 Kanälen, die Grenzfrequenz liegt bei ≈ 10 kHz.
Elektronenstrahloszillograf. Anzeigegerät und charakteristisches Bauteil ist die Elektronenstrahlröhre. Dem vertikalen Ablenksystem Y ist der Y-Eingang mit einer zweistufigen Verstärkung zugeordnet. An das horizontale Ablenksystem X kann wahlweise eine im Gerät erzeugte Kippspannung für die Zeitablenkung oder der X-Eingang geschaltet werden, beide mit einer einstufigen Verstärkung.
Die Ablenkung des Elektronenstrahls ist proportional der Spannung an den Ablenkplatten, wodurch der Oszillograf grundsätzlich Spannungen mißt. Die Grenzfrequenz liegt bei 10^2 bis 10^6 kHz. Die häufigste Betriebsart ist die Abbildung des zeitlichen Verlaufs der Meßgrößen, wozu der Y-Eingang benutzt wird. Typische Messungen sind Amplituden- und Zeitmessungen sowie die Ermittlung von überlagerten Schwingungen oder Spannungsspitzen. Verwendet man statt der Zeitablenkung eine Sinusspannung am X-Eingang, so werden die Werte der Meßgröße in jedem Zeitpunkt den Werten der Sinusspannung zugeordnet. Es entstehen dann die sog. Lissajous-Figuren, die für die Bestimmung der Frequenz geeignet sind.

13.2. Messen einzelner Größen

13.2.1. Messung elektrischer Größen

Die wichtigsten Meßgeräte zur Messung elektrischer Größen wurden in 13.1.7. und 13.1.8. beschrieben. Der vorliegende Abschnitt beschränkt sich deshalb auf die Angabe der jeweils zu benutzenden Meßgeräte und der wichtigsten Meßschaltungen.
Stromstärke. Strommesser sind bevorzugt Drehspul- und Dreheiseninstrumente. Strommesser werden grundsätzlich in den Stromzweig, d. h. in Reihe mit dem Meßobjekt, geschaltet und sollen einen möglichst geringen Innenwiderstand besitzen, $R_M \ll R$, um die Meßgröße möglichst wenig zu verfälschen. Eine Meßbereichserweiterung erfolgt durch Parallelwiderstände oder Stromwandler.
Spannung. Spannungsmesser sind bevorzugt Drehspul- und Dreheiseninstrumente. Sie wer-

den grundsätzlich parallel zum Meßobjekt geschaltet und sollen einen möglichst hohen Innenwiderstand aufweisen, $R_M \gg R$, um die Meßgröße möglichst wenig zu verfälschen. Zur Meßbereichserweiterung werden Vorwiderstände oder Spannungswandler eingesetzt. Für Präzisionsmessungen werden Spannungskompensatoren oder Digitalvoltmeter verwendet (vgl. 13.2.12.).

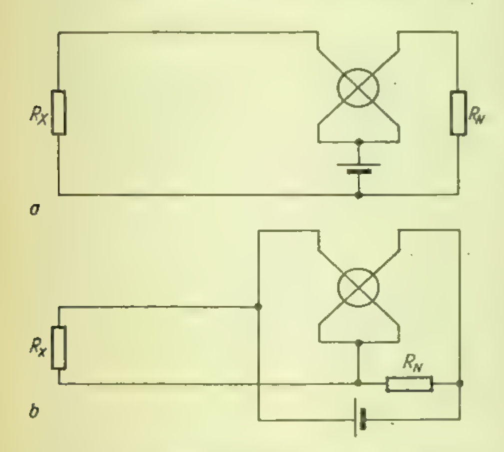


Abb. 13.2.1-1 Widerstandsmessung: a Stromvergleich (bei großem R_X), b Spannungsvergleich (bei kleinem R_X)

Widerstand. Als Meßgeräte werden hauptsächlich sog. Drehspul-Ohmmeter, Kreuzspulinstrumente (Abb. 13.2.1-1) und Meßbrücken benutzt. Drehspul-Ohmmeter sind in Widerstandseinheiten graduierte Drehspulinstrumente. Das einfachste indirekte Verfahren, auch geeignet für die Ermittlung nichtlinearer Widerstände, ist die Strom- und Spannungsmessung.

Induktivität, Kapazität. Bevorzugte Meßgeräte sind Meßbrücken. Eine weitere Möglichkeit ist die Messung nach dem Resonanzverfahren. Die Verstimmung eines Resonanzkreises wird dabei durch Änderung der Kapazität rückgängig gemacht, wobei die Kapazitätsänderung zwangsläufig der zu bestimmenden Induktivität oder Kapazität entspricht. Ein indirektes Verfahren ist die Bestimmung aus der Abschaltzeitkonstante $\tau = L/R$ bzw. aus der Entladezeitkonstante $\tau = RC$.

Leistung. Als Leistungsmesser werden hauptsächlich elektrodynamische Instrumente verwendet. Sofern die Spannung als konstant vorausgesetzt werden kann, werden auch Drehspul-Wattmeter eingesetzt, d. h. in Leistungseinheiten graduierte Drehspulinstrumente. Als indirektes Verfahren für Gleichstromnetze eignet sich, wie bei der Widerstandsbestimmung, die Strom- und Spannungsmessung. In Drehstromnetzen verwendet man die Drei- bzw. Zweileistungsmesserschaltung (Abb. 13.2.1-2), wobei die Meßwerke mechanisch gekoppelt sein können und so die Summe bilden. Bei gleich belasteten Phasen wird nur ein Leistungsmesser eingesetzt, wobei der Faktor 3 eventuell durch eine entsprechende Skale berücksichtigt ist. Blindleistungsmesser lassen sich ebenfalls mit elektrodynamischen Instrumenten realisieren. Dazu muß der Strom im Spannungspfad um 90° phasenverschoben werden.

Leistungsfaktor, Phase. Als Leistungsfaktor- und Phasenmesser sind nur elektrodynamische Quotientenmeßgeräte, d. h. elektrodynamische Kreuzspul- oder Kreuzfeldinstrumente, geeignet.

Frequenz. Zur Messung der Frequenz werden Zungenfrequenzmesser oder beschaltete elektrodynamische Quotientenmeßgeräte verwendet. Im Mittel- und Hochfrequenzbereich verwendet man den Elektronenstrahloszillografen, vorzugsweise durch Vergleich mit einer einstellbaren bekannten Frequenz mittels Lissajous-Figuren.

Elektrische Arbeit. Als Meßgeräte für die elektrische Arbeit werden Elektrizitätszähler (vgl. Abb. 13.1.7-5) verwendet. Die möglichen Schaltungen entsprechen den für die Leistungsmessung aufgeführten Varianten.

13.2.2. Messen von Längen und Winkeln

Längen und Winkel werden meist mechanisch mit Hilfe von *Maß-* bzw. *Winkelverkörperungen* oder mit anzeigenden mechanischen Meßgeräten bestimmt. In verschiedenen Anwendungsgebieten werden auch mechanisch-optische, optische, elektrische und pneumatische Meßgeräte eingesetzt. Die Größenart Länge l hat die SI-Grundeinheit Meter (m) und die Größenart ebener

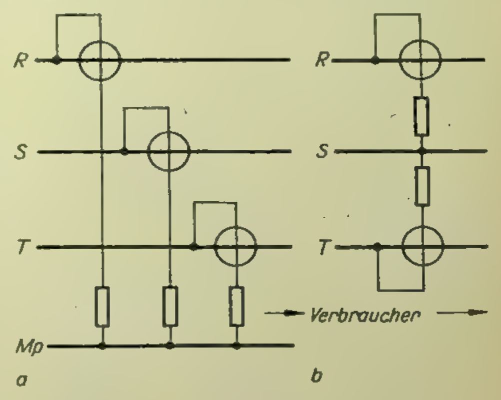


Abb. 13.2.1-2 Leistungsmessung bei Drehstrom: a Dreileistungsmesser-Schaltung, b Zweileistungsmesser-Schaltung (Aron-Schaltung): waagerecht Strompfade und senkrecht Spannungspfade der Leistungsmesser

Winkel α die SI-Einheit Radiant (rad). Die Bezugstemperatur für technische Längen- und Winkelmessungen beträgt 20 °C.

Maßverkörperungen. *Parallelendmaße* sind Blöcke aus gehärtetem und geläpptem Stahl mit rechteckigem Querschnitt, deren Maß durch den Abstand der 2 ebenen Meßflächen definiert ist. Sie werden zum direkten Messen verwendet, z. B. zum Messen einer Schlitzbreite oder eines Bohrabstands zwischen eingesetzten Meßdornen usw., sowie in Verbindung mit angeschobenen Meßschnäbeln in einem Endmaßhalter oder mit einem Halter, der mit einem Fuß senkrecht auf eine Fläche aufgesetzt werden kann, und entsprechend ausgebildeten Endmaßschnäbeln als Höhenreißer. Durch „Ansprengen" oder „Anschieben" der sorgfältig gereinigten Parallelendmaße können Kombinationen beliebiger Länge zusammengestellt werden. Man unterscheidet die Endmaße nach verschiedenen Genauigkeitsgraden: Genauigkeitsgrad 0 für höchste Genauigkeitsforderungen bis zum Genauigkeitsgrad III für Mindestanforderungen, z. B. für Einstell- und Arbeitsnormale an Werkzeugmaschinen, Vorrichtungen usw. *Strichmaße* haben Teilungsstriche, deren Abstand das Längenmaß darstellt. Die Bezifferung eines Teilstrichs gibt seinen Abstand zum Nullstrich der Teilung in Einheiten des Längennormals an und kennzeichnet das Sollmaß. *Maßstäbe* werden aus Holz, Kunststoff, Stahl o. ä. gefertigt. Die Teilungsstriche sind aufgedruckt, geprägt, gewalzt oder geätzt. Das *Bandstahllineal* ist ein Maßstab mit abgeschrägter Kante, 1 mm Dicke, 70 mm Breite und den handelsüblichen Längen von 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m. *Stahl-* oder *Reduktionsmaßstäbe* beinhalten in ihrer Bezifferung die Reduktion 1:x oder x:1 und geben an, wieviel mal verkleinert oder vergrößert ein Objekt in der Zeichnung dargestellt wird. Zu den *Strichmaßstäben* gehören: *Arbeitsmaßstäbe* aus ungehärtetem Stahl bis zu 5 m Länge; *Prüfmaßstäbe* zur Prüfung der Arbeitsmaßstäbe bis zu 2 m Länge und einem Teilungsstrichfehler von $f = \pm (10\ \mu m + 10^{-5} \cdot l)$, wobei l der Abstand des Teilstrichs vom Nullstrich ist; *Vergleichsmaßstäbe* mit H-, X- oder U-förmigen Querschnitten und Längen bis zu 1 m. Die Teilung erfolgt in der neutralen Faser des Metallkörpers. Der Teilungsstrichfehler errechnet sich aus $f = \pm (5\ \mu m + 5 \cdot 10^{-5} \cdot l)$. Vergleichsmaßstäbe werden zur Eichung der Prüfmaßstäbe eingesetzt. Zu den Strichmaßstäben ist auch der *Urmaßstab* (Urmaß) zu rechnen. Bis zur Definition des Meters durch die Wellenlänge des Lichts des Atoms Krypton waren die Urmaßstäbe in den 40 Mitgliedstaaten der internationalen Meterkonvention die Basis der Eichung aller Längenmeßgeräte. *Gliedermaßstäbe* („Zollstock") sind zusammenklappbare Maßstäbe. *Maßbänder* werden aus Federbandstahl oder Textilband hergestellt für Längen von 100 mm bis 50 m.

Winkelverkörperungen. *Winkelendmaße* sind Stahlkörper, bei denen ein bestimmter Winkel durch 2 ebene Meßflächen dargestellt wird. Durch Kombination von Winkelendmaßen lassen sich ähnlich zu den Parallelendmaßen gewünschte Winkelmeßstücke zusammensetzen. Ein solcher Satz von Winkelendmaßen enthält z. B. 16 Winkelendmaße.

Das *Sinuslineal* wird in Verbindung mit Parallelendmaßen und Meßdornen zur Darstellung von Winkeln verwendet. Ist l die Länge der Endmaße und a der Abstand der Achsen der Meßdorne, so bildet die Fläche des Sinuslineals mit einer ebenen Auflagefläche den Winkel entsprechend der Gleichung $l/a = \sin \alpha$.

Stahlwinkel, nach der Genauigkeit unterschieden in *Werkstatt-*, *Normal-* und *Haarwinkel*, werden für Anreiß- und Prüfarbeiten verwendet.

Winkelmesser sind Zeichengeräte zum Messen oder Abtragen von Winkeln oder Richtungen. Verwendet werden zahlreiche Ausführungsformen, z. B. als Vollkreis- oder Halbkreiswinkelmesser, aber auch in Dreieck-, Viereck- oder Linealform. Übliche Winkelteilungen sind 6,28 Radiant (2π, 360°) für den Vollkreis. *Präzisionswinkelmesser* werden als Vollkreiswinkelmesser mit Bezifferung in beiden Richtungen und mit Schwenklineal um das Zentrum mit Nonius für die Winkeleinstellung aus Metall gefertigt. *Universalwinkelmesser* gestatten das Messen und Einstellen von Winkeln mittels eines verstellbaren Lineals zu einer festen Meßfläche an einem Teilkreis mit Nonius.

Anzeigende mechanische Längenmeßgeräte. *Meßschieber* (Schieblehre) bestehen i. allg. aus 2 Meßschnäbeln, von denen der feststehende Schnabel mit der Schiene, die den Maßstab trägt, verbunden ist. Der andere Schnabel mit dem Schieber, auf dem sich eine Marke oder der Nonius befindet, ist auf der Schiene verschiebbar.

Bei der üblichen Noniusteilung (auf 9 Teilstriche der Hauptteilung kommen 10 Teilstriche der Noniusteilung) können 0,1 mm abgelesen werden. Sonderformen von Meßschiebern sind der *Höhenreißer*, bei dem der feststehende Schnabel als Fuß ausgebildet ist, der *Tiefenmesser*, bei dem das ermittelte Maß auf das Ende der Schiene bezogen wird, und die *Keilnut-Meßlehre* zur Nuttiefenmessung an Wellen.

Meßschrauben (Mikrometerschraube, Schraublehre) haben eine in einer Meßtrommel geführte Gewindespindel mit genauer Steigung. Die axiale Verschiebung der Spindel gegenüber einer Marke für eine volle Umdrehung wird durch die Längsteilung auf der Spindel (meist 1 mm) angezeigt, Bruchteile der Längsteilung durch eine Rundteilung auf der Trommel (z. B. 100 Teilstriche auf dem Umfang), so daß 0,01 mm abgelesen werden können. Die maximale Spindellänge beträgt 25 mm. *Bügelmeßschrauben* werden zur Bestim-

mung von Außenmaßen, Meßschrauben mit seitlich angesetzten Meßschnäbeln oder -flächen für Innenmessungen eingesetzt. *Feinzeigermeßschrauben* ermöglichen die Kontrolle der wirksamen Meßkräfte auf das Objekt.

Meßuhren zeigen vergrößert den Weg eines Meßbolzens unter Verwendung einer Zahnstange oder eines Hebels und von Zahnrädern an. Die Lose der Mechanik wird dabei durch eine Vorspannfeder beseitigt. Der Zeiger der Meßuhr kann mehrere Umdrehungen ausführen, wodurch ein maximaler Meßbereich von 10 mm möglich ist.

Richtwaagen (Wasserwaagen) dienen zum Ausrichten in die waagerechte oder senkrechte Lage und zum Ermitteln kleiner Winkelabweichungen von diesen Lagen. Als Skalenwert wird diejenige Neigung in Millimeter je Meter bezeichnet, die die Verschiebung einer Luftblase in einer gewölbten durchsichtigen mit Flüssigkeit gefüllten Röhre (*Röhrenlibelle*) um einen Teilstrich entspricht. Zum Ausrichten von Flächen sind Richtwaagen mit 2 Röhrenlibellen – einer Längs- und einer Querlibelle – nötig oder solche mit einem Flüssigkeitsbehälter, der die Form eines Kugelabschnitts hat (*Dosenlibelle*). Die im Bauwesen benutzte *Setzwaage* ist eine Holzleiste entsprechenden Querschnitts mit eingeschlossener Röhrenlibelle. Die *Rahmenrichtwaage* ist ein gußeiserner Rahmen mit prismatischer Grund- und Deckleiste und wird im Maschinenbau angewendet. Richtwaagen werden nach Genauigkeitsklassen unterschieden, z. B. Klasse I ≙ 0,03 mm/m bis 0,05 mm/m und Klasse IV ≙ 0,8 bis 1,6 mm/m. *Winkellibellen* dienen zum Messen von Neigungen von Maschinentischen oder von größeren Winkeln an Werkstücken (bis ± 120°).

Optische Feinmeßgeräte ermöglichen eine genaue Längen- oder Winkelmessung. Dabei werden die optischen Hilfsmittel zur Verbesserung der Ablesegenauigkeit, zur berührungslosen Antastung oder zum Anvisieren des Prüfstücks eingesetzt.

Meßlupen werden zum Messen kurzer Längen verwendet. Die Messung erfolgt durch direktes Aufsetzen der Meßlupe auf das Meßobjekt und Ablesen vom Meßstab mit $^1/_{100}$ mm Teilung im Fuß der Meßlupe.

Optimeter werden insbesondere zur Bestimmung von Längen- oder Durchmesserunterschieden gegenüber einem als Normal vorgegebenen Werkstück benutzt. Eine mit Lichtquelle, Kondensorlinse und feststehender Strichmarkenplatte erzeugte Lichtmarke wird durch ein Objekt und einen kippbaren Spiegel, der mit dem Tastelement mechanisch gekoppelt ist, auf eine Skale reflektiert. Wird beim Antasten des Prüflings der Spiegel ausgelenkt, so bewegt sich die Lichtmarke proportional der Auslenkung der Tastspitze auf der Meßskale.

Längenmesser verwenden ebenfalls eine mechanische Antastung des Prüfstücks und eine optische Ablesung mittels Feinmeßokular. Sie erreichen eine Meßwertauflösung von $^1/_{100}$ mm. *Längenmeßmaschinen* sind ähnlich den Längenmessern aufgebaut; mit 2 Mikroskopen ausgestattet und ermöglichen genaueste Längenmessungen bis zu 10^{-4} mm. Angewendet wird das Komparatorprinzip, d. h. die Länge des Prüflings wird mit einem Präzisionsmaßstab als Normal verglichen. Die Antastung des Prüflings erfolgt mit einem Zielmikroskop, das in der Okularbildebene ein Strichkreuz hat und eine 10- bis 100fache Vergrößerung ermöglicht. Der Längenvergleich erfolgt mit einem Ablesemikroskop mit Feinmeßokular. Die Längenmeßmaschine wird u. a. zur Teilungsmessung an Maßstäben oder zur Steigungsmessung von Präzisionsgewinden verwendet.

Winkelmesser entsprechen in ihrem Grundaufbau dem Längenmesser bzw. der Längenmeßmaschine. Die *Winkelmesser mit optischem Rundtisch*, d. h. der Aufnahmetisch des Prüflings, ist um eine Achse drehbar, mit der ein Präzisionsteilkreis verbunden ist. Die Antastung und Ablesung erfolgen ebenfalls mit Mikroskopen, die mit speziellen für die Winkelmessung geeigneten Okularköpfen versehen sind. *Winkelmesser mit optischem Teilkopf* haben Kompaktgehäuse, in dem ein Mikroskop mit einem Feinmeßokulator (in dem sich eine mit einer Präzisionsspindel drehbare Okularstrichplatte befindet), ein Präzisionsteilkreis und eine präzisionsgelagerte Drehachse zur Aufnahme des Prüflings untergebracht sind. Ist der Prüfling zwischen die Spitzen der Drehachsen des Teilkopfs und eines Reitstocks gespannt, so kann die Winkelstellung des zu prüfenden Werkstücks an einem Fenster des Teilkopfs abgelesen werden (Abb. 13.2.2-1).

Autokallimationsfernrohre werden zum Messen sehr kleiner Winkel bzw. zur Richtungsprüfung

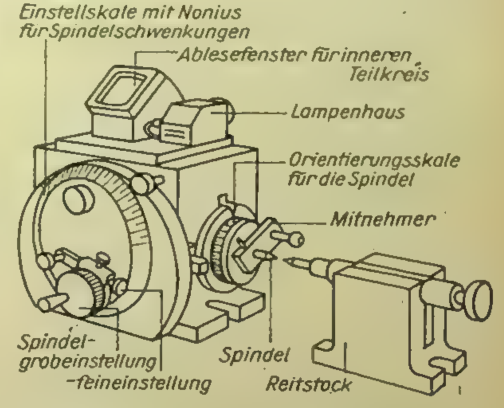


Abb. 13.2.2-1 *Winkelmesser mit optischem Teilkopf*

benutzt. Eine Verkippung des Prüflings bewirkt dabei die Verschiebung eines Fadenkreuzes gegenüber Strichmarken in der Zwischenbildebene des Fernrohrs.

13.2.3. Messen von Geschwindigkeit und Drehzahl

Geschwindigkeitsmeßgeräte bestimmen die Geschwindigkeit eines Körpers gegenüber einem Bezugspunkt oder dem umgebenden Medium. Die SI-Einheit der Geschwindigkeit ist Meter je Sekunde (m/s). Für die Geschwindigkeitsbestimmung eines Objekts (z. B. Flugkörper, Fahrzeug, Lebewesen o. ä.) von außen wird meist die *Weg-Zeit-Methode* angewendet, d. h. die Geschwindigkeitsmessung wird auf eine Weg-Zeit-Messung zurückgeführt. Dabei wird eine der Größen konstant vorgegeben und die andere gemessen.

Impulsradargeräte führen die Geschwindigkeitsmessung eines Flugkörpers (z. B. Rakete, Raumkörper) auf eine Entfernungsmessung zurück (vgl. 11.4.6.) Aus der nach einer weiteren Messung feststellbaren Entfernungsdifferenz und dem zeitlich festgelegten Impulsabstand wird die Geschwindigkeit errechnet. Für die Ermittlung der Geschwindigkeit von Flugkörpern im freien Raum sind 2 räumlich voneinander getrennt stehende Impulsradargeräte erforderlich.

Dopplerradargeräte werden zur Bestimmung der Augenblicksgeschwindigkeit in Verkehrstechnik, Navigation, Ballistik und Raketentechnik eingesetzt. Der Meßbereich erstreckt sich bei normal verwendeten Frequenzen von 10 GHz von ≈ 4 m/s (14,4 km/h) bis zu 1 500 m/s (5 400 km/h). Bei der Überwachung im Verkehrswesen wird von einer Sende- und Empfangseinrichtung eine mit konstanter Frequenz scharf gebündelte elektromagnetische Welle auf das zu messende Objekt gerichtet und die vom Objekt teilweise reflektierten Wellen empfangen. Durch die Bewegung des Objekts wird die Frequenz der reflektierenden Welle richtungs- und geschwindigkeitsabhängig erhöht oder erniedrigt. Durch Überlagerung der Sende- mit der Reflexionsfrequenz entsteht eine niederfrequente Schwebung (*Dopplerfrequenz*), die der Geschwindigkeit des Objekts direkt proportional ist. Nach elektronischer Umformung wird sie in einen proportionalen Strom umgewandelt, der an einem in Kilometer je Stunde geeichten Instrument angezeigt werden kann. In Luftfahrzeugen wird das Dopplerradargerät zur Bestimmung der Fluggeschwindigkeit bezogen zur Erde und zur Messung der Abdrift eingesetzt (vgl. 11.4.6.).

Zur Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit im Fahrzeug werden *Tachometer* verwendet. Hierbei wird die Geschwindigkeit mittels eines rollenden Rades in eine Drehbewegung umgewandelt, die mit einem Drehzahlmesser, dessen Skale in Einheiten der Geschwindigkeit geeicht ist, gemessen wird.

Staudruckmeßgeräte bestimmen die relative Geschwindigkeit eines Körpers zu seinem umgebenden Medium, z. B. Flugzeug zur Luft, Schiff zum Wasser. Angewendet wird das *Prandtlsche Staurohr*, eine Sonde mit einer Meßstelle für die Summe von Staudruck und statischem Druck und einer weiteren für den statischen Druck. Die wirksame Druckdifferenz wird mit einem Federmanometer gemessen und mit mechanischen Mitteln angezeigt. An einer geeichten Skale kann die Relativgeschwindigkeit abgelesen werden. Die Genauigkeit der Messung liegt bei ± 2 %. Für kleine Strömungsgeschwindigkeiten ($v < 1$ m/s für Flüssigkeiten und $v < 30$ m/s für Niederdruckgase) sind Staurohrsonderarten erforderlich, die den auftretenden Staudruck wesentlich verstärken. Verwendet werden Staudruckmultiplikatoren, die auf dem Prinzip zweier ineinander geschachtelter *Venturirohre* beruhen. Es wird damit eine 10- bis 20fache Staudruckverstärkung erzielt.

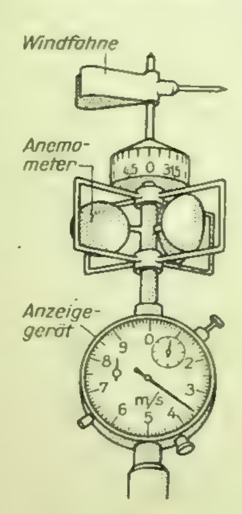


Abb. 13.2.3-1
Anemometer

Anemometer bestimmen die Windgeschwindigkeit. Dabei wird die Geschwindigkeit durch ein mit 3 oder 4 Halbkugelschalen versehenes drehbar gelagertes Kreuz in eine Drehbewegung umgeformt (Abb. 13.2.3-1). Dabei dreht sich das Kreuz so, daß die Halbkugeln mit ihrer gewölbten Seite der Strömung entgegenlaufen, da bei einer Halbkugel der Strömungswiderstand der konkaven Fläche um den Faktor 3,85 größer ist als der der konvexen Fläche. Die Drehbewegung wird mittels Tachometer direkt in Geschwindigkeitswerten angezeigt, oder die Geschwindigkeit wird mittels Umdrehungszählwerk und Zeitmessung ermittelt.

Drehzahlmesser bestimmen die Umlauffrequenz, d. h. die Anzahl der periodischen Umdrehungen

eines rotierenden Gegenstands (Wellen, Walzen, Räder u. ä.) je Zeiteinheit. Die abgeleitete SI-Einheit der Drehzahl n ist Umdrehung je Sekunde ($1 \; s^{-1}$). Für die Konstruktion der Drehzahlmesser werden mechanische und elektrische Wirkprinzipe angewendet.

Fliehpendelmeßwerke sind mechanische Drehzahlmesser, bei denen die Fliehkraft rotierender Pendel, die einseitig an einer drehbar gelagerten Muffe befestigt sind, durch eine gleich große Federkraft ausgeglichen wird. Der Federweg der Schraubenfeder ist dann der Drehzahl der Pendel proportional. Verwendet wird das Fliehpendelmeßwerk z. B. bei der Zündverstellung im Kraftfahrzeug.

Wirbelstromtachometer. Direkt mit der Drehachse verbunden oder über eine zusätzliche bewegliche Welle angetrieben, rotiert ein Permanentmagnet in einer gelagerten Aluminiumglocke mit der zu messenden Drehzahl. Der rotierende Magnet induziert in der Glocke Wirbelströme, die wiederum ein Drehmoment auf die Glocke ausüben, das durch eine Feder an der Glocke kompensiert wird. Da das Drehmoment den gleichen Richtungssinn hat wie die Drehzahl, ist der Ausschlag eines Zeigers, der mit der Glocke gekoppelt ist, ein Maß für Drehrichtung und -zahl.

Gleichstromtachometer sind speziell dimensionierte Gleichstromgeneratoren. Dabei ist die Amplitude der erzeugten Generatorspannung der Drehzahl proportional und die Polarität kennzeichnet die Drehrichtung. Die Spannung kann z. B. durch ein Drehspulmeßwerk angezeigt und bei entsprechender Eichung der Skale unmittelbar die Drehzahl des Generators abgelesen werden.

Wechselstromtachometer erzeugen eine Wechselspannung, die der Drehzahl des Generators proportional ist. Die Weiterverarbeitung und Auswertung der Generatorspannung erfolgt ähnlich wie beim Gleichstromtachometer.

Elektronische Drehzahlmesser basieren auf der elektromechanischen oder fotoelektrischen Erzeugung von Impulsfolgen durch das Zusammenwirken von auf der Drehachse montierten Rasterelementen und justiert dazu feststehend angebrachten Abtastelementen. Die erzeugte Impulsfrequenz ist der Umlauffrequenz proportional und kann durch Frequenzmesser angezeigt oder in Automatisierungseinrichtungen ausgewertet werden. Als Rasterelement kann z. B. eine Lochscheibe und als Abtastelement die Kombination von Lichtquelle und Fotozelle dienen.

13.2.4. Waagen und Kraftmessung

Waagen sind Einrichtungen, mit denen die Masse eines Wägegutes bestimmt wird. Das Wägen erfolgt durch Vergleich der zu bestimmenden Masse mit einer Vergleichsmasse oder durch die Messung der Gewichtskraft, die das Schwerefeld der Erde auf die Masse ausübt. Fälschlich wird die Massebestimmung durch Wägung als Gewichtsbestimmung bezeichnet. Die Grundeinheit der Masse ist das Kilogramm (kg).

Hebelwaagen vergleichen die Drehmomente, die die Masse eines Wägegutes und eine Vergleichsmasse an den beiden Armen eines zweiarmigen Hebels hervorrufen. Nach der Ausführung unterscheidet man *gleicharmige Hebelwaagen, Laufgewichts-, Schaltgewichts-* und *Neigungswaagen.* Der Ausgleich der Hebelwaagen erfolgt durch Veränderung der Vergleichsmassen, die nicht mit der Waage verbunden sind (z. B. Tafel- und Dezimalwaagen), durch Veränderung der wirksamen Länge des Hebelarms, wobei die Vergleichsmasse konstant und mit der Waage verbunden ist (z. B. Laufgewichts-, Neigungswaagen), oder durch eine Kombination der genannten Ausgleichsprinzipien (z. B. Tafel-Neigungs-Waage).

Federwaagen bestimmen die Masse eines Wägegutes aus der elastischen Verformung von Schraubenfedern; nur bei Feinfederwaagen werden Spiral- oder Torsionsfedern verwendet.

Elektromechanische Waagen (ungenauer elektronische Waagen) nutzen zur Wägung die Wirkung der Gewichtskraft der zu bestimmenden Masse auf einen Verformungskörper aus. Deshalb ist das Kernstück einer elektromechanischen Waage ein als *Kraftmeßdose* bezeichneter Meßwertgeber, in dem die Gewichtskraft je nach Wirkprinzip entweder eine Längenänderung eines Dehnungsmeßstreifens oder einer Feder bewirkt. Die Widerstandsänderung des Dehnungsmeßstreifens ist der Verformung proportional. Die Längenänderung der Feder beeinflußt proportional die Induktivität einer Spule oder die Kapazität eines Kondensators. Im Ausgang steht jeweils als Meßgröße eine elektrische Spannung zur Verfügung, die der Gewichtskraft des Wägegutes proportional ist und die so umgeformt wird, daß sie analog oder digital angezeigt werden kann. Weiterhin kann das elektrische Meßsignal durch Schreiber, Druckwerke oder Buchungsmaschinen registriert oder in EDV-Anlagen weiterverarbeitet werden. Angewendet werden die elektromechanischen Waagen als Kranwaagen, bei denen das Wägegut meist unmittelbar auf die Kraftmeßdose wirkt, als Straßen- und Gleiswaagen, als Abfüllwaagen, bei denen das Wägegut selbsttätig zugeführt, gewogen und abtransportiert wird, oder als Bandwaagen, bei denen die Masse des Wägegutes kontinuierlich bestimmt wird.

Radiometrische Waagen bestrahlen das Wägegut mit Gammastrahlung und werten die Absorption oder die Streuung der Strahlung, die von dem Wägegut verursacht wird, aus.

13.2.5. Druckmessung

Druckmesser (Manometer) sind Geräte, mit denen der Druck von Gasen, Dämpfen oder Flüssigkeiten bestimmt wird. Als Druck p wird der Quotient aus einer senkrecht auf eine Fläche A gleichmäßig verteilt wirkenden Kraft F und der Größe dieser Fläche bezeichnet. Es gilt $p = F/A$. Die SI-Einheit des Drucks ist Pascal (Pa) = Newton je Quadratmeter (N/m^2). Entsprechend dem Wirkprinzip und der Konstruktion messen Druckmesser den absoluten Druck, den Über- und Unterdruck gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck oder den Differenzdruck gegenüber einem beliebigen Bezugsdruck.

Barometer messen den atmosphärischen Luftdruck unmittelbar. Unterschieden werden Quecksilber- und Aneroidbarometer.

Quecksilberbarometer werden als *Gefäß-*, *Gefäßheber-*, *Heber-* oder *Fortinbarometer* ausgeführt, bei denen jeweils ein quecksilbergefülltes, einseitig geschlossenes Glasrohr in ein mit Quecksilber gefülltes Barometergefäß taucht, auf dessen Quecksilberoberfläche der atmosphärische Druck einwirkt. Die Höhendifferenz zwischen der Quecksilberoberfläche im Gefäß und im Rohr ist dann dem wirkenden atmosphärischen Druck proportional. Ein Quecksilberbarometer, als Heberbarometer ausgeführt, zeigt Abb. 13.2.5-1. Eingesetzt werden sie vorwiegend im meteorologischen Dienst als Normal- und Stationsbarometer.



Abb. 13.2.5-1 Heberbarometer

Aneroidbarometer enthalten als Meßglied eine evakuierte, dünnwandige, flache Metallkapsel oder ein entsprechendes Metallrohr, die unter dem Einfluß des atmosphärischen Drucks elastisch verformt werden. Die Verformung ist dem äußeren Druck proportional und wird analog angezeigt. Das Aneroidbarometer ist wegen seines handlichen und leichten Aufbaus weit verbreitet, u. a. auch im Haushalt.

Das *Hypsometer* überführt die Messung des Luftdrucks in eine Bestimmung des Siedepunkts,

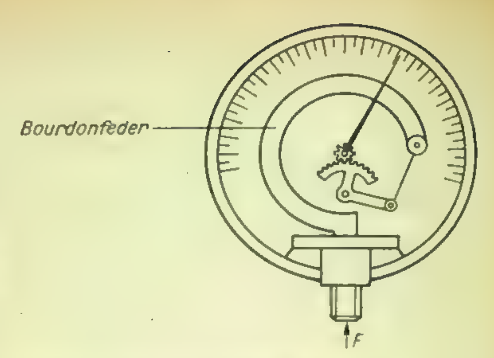


Abb. 13.2.5-2 Rohrfedermanometer

da der Siedepunkt einer Flüssigkeit die Temperatur ist, bei der der Dampfdruck gleich dem atmosphärischen Druck auf ihrer Oberfläche ist. Angewendet wird das Hypsometer besonders in der Höhenforschung.

Blutdruckmesser werden zur Bestimmung des arteriellen und venösen Blutdrucks eingesetzt. Unterschieden werden 2 indirekt arbeitende Methoden: mit Manschette, Pumpe und Manometer (vgl. 12.4.1.) und mit Pelotte. Die *Pelotte* ist ein dünnwandiges, bewegliches, luft- oder flüssigkeitsgefülltes Gefäß, das auf die Arterienwand aufgebracht wird und dessen Innendruck den Arteriendruck abbildet. Mit dem Kolben-Elektro-Manometer wird eine absolute, direkte Messung durchgeführt.

Manometer dienen in der Verfahrenstechnik der Druckmessung und sind dadurch eine wichtige Voraussetzung für die Steuerung bzw. Regelung von Prozessen.

Federmanometer messen Über- und Unterdrücke, wobei als Bezugsdruck der atmosphärische Druck wirkt. Wesentliches Merkmal aller Federmanometer ist ein elastisches Meßglied. Beim *Rohrfedermanometer* ist es ein kreisförmig gebogenes Rohr mit elliptischem oder ovalem Querschnitt und einem Windungswinkel von $\approx 1{,}5\ \pi$ rad (Abb. 13.2.5-2). Unter Einwirkung des zu messenden Drucks in der Bohrung des Rohrs strebt der Querschnitt die Kreisform an und biegt dabei das Rohr auf. Das Meßglied des *Schraubenfedermanometers* ist eine mit konstantem Radius gewundene Rohrfeder, das des *Schneckenfedermanometers* eine in einer Ebene mit veränderlichem Krümmungsradius gewickelte Rohrfeder. *Plattenfedermanometer* haben eine eingespannte Membran, deren Durchbiegung durch Druckeinwirkung proportional dem wirksamen Differenzdruck an der Membran ist und die durch mechanische Elemente angezeigt wird. *Kapselfedermanometer* sind ähnlich dem Plattenfedermanometer aufgebaut. Eine Metalldose aus 2 gewellten, am Rand verbundenen Membranen bildet das Meßglied. *Wellrohrfedermanometer* erzeugen durch Verwendung eines Wellrohrs als Meßglied größere Verstellkräfte für die

Auswertung. *Federmanometer mit elektrischen Abgriffelementen* verknüpfen das elastische Meßglied mit elektronischen Mitteln zur Signalabnahme. Angewendet werden *Dehnungsmeßstreifenmanometer, Schwingsaitenmanometer, Manometer mit Differentialtransformator, kapazitive Manometer.*

Flüssigkeitsmanometer. Die *U-Rohr-Manometer* werden zur Messung von Über-, Unter- und Differenzdrücken eingesetzt. Ausführungsformen sind Manometer mit 2 flüssigkeitsgefüllten, gleichweiten Schenkeln, mit einem Schenkel und einem weiten Niveaugefäß, mit umgekehrten Schenkeln zum Anschluß vor und hinter einer Meßblende eines Rohres zur Bestimmung kleiner Druckdifferenzen und die Ringwaage (vgl. 13.2.7.). Gebräuchliche Meßflüssigkeiten sind Quecksilber, Wasser, Äthylalkohol, Äthyläther und Toluol. U-Rohr-Manometer gestatten eine sehr genaue Messung und sind für Meßbereiche von 0,5 bis 150 kPa geeignet. Der Einsatz erfolgt zumeist im Labor. Beim *Schrägrohrmanometer* als Sonderausführung des U-Rohr-Manometers wird zur weiteren Ausschlagvergrößerung das Steigrohr geneigt angeordnet und die Genauigkeit damit weiter erhöht. *Kolbenmanometer* messen den Absolutwert von Gasen bis 5 MPa und für Flüssigkeiten bis 2000 MPa. Wesentliches Konstruktionselement ist in einem Hohlzylinder ein gewichtsbelasteter Kolben, der mit einer Skale gekoppelt ist.

Elektrische Druckmesser nutzen direkt die Materialeigenschaften von Stoffen aus, die unter Einwirkung von Druck ihre elektrischen und magnetischen Parameter verändern. Durch eine elektronische Signalverarbeitung wird die Meßgröße bis zur Nutzung in einer Anzeige- oder Registriereinrichtung aufbereitet. Bei *Widerstandsmanometern* wird die Abhängigkeit des Widerstands einer Speziallegierung (z. B. Manganin) oder eines Halbleiters von dem auf ihn einwirkenden äußeren Druck zur Anzeige verwendet.

Piezoelektrische Manometer basieren auf der Entstehung von elektrischen Ladungen, die proportional der Druckbelastung auf die Außenflächen bestimmter Kristalle auftreten. *Manometer mit magnetoelastischem Transformator* haben einen Spezialtransformator, der unter Druckeinwirkung die Permeabilität seiner Bleche richtungsabhängig verändert. Die dabei entstehende Anisotropie ruft eine Spannung in der Sekundärwicklung hervor, die dem Druck proportional ist.

13.2.6. Messung von Füllstand und Wassertiefe

Füllstandsmessung. Die Messung der Standhöhe von Flüssigkeiten und Schüttgütern in Behältern erfolgt abhängig von Art und Menge des Meßguts, der Behälterkonstruktion sowie der geforderten Meßgenauigkeit.

Schwimmerprinzip. Ein Schwimmkörper, der spezifisch leichter ist als die Flüssigkeit, folgt dem steigenden oder fallenden Flüssigkeitspegel. Er ist mechanisch (Kette, Seil, Hebelarm) oder magnetisch mit einer Anzeigeeinrichtung, einem elektrischen oder pneumatischen Ferngeber verbunden (Abb. 13.2.6-1).

Tauchkörperprinzip. Auf einen in der Flüssigkeit befindlichen Tauchkörper wirkt eine Kraft, die dem vom Tauchkörper verdrängten Flüssigkeitsvolumen und dem spezifischen Gewicht der Flüssigkeit entspricht. Diese Kraft wird mechanisch, elektrisch oder pneumatisch gemessen und entspricht der Eintauchtiefe bzw. dem Füllstand.

Hydrostatische Bodendruckmessung. Bei offenem Behälter beträgt der vom Behälterquerschnitt unabhängige Bodendruck $p = h \cdot \varrho \cdot g$ (h = Höhe der Flüssigkeitssäule, ϱ = Dichte der Flüssigkeit, g = Erdbeschleunigung). Dieser Druck wird mittels Membran in einen proportionalen Weg umgeformt, der entweder mechanisch, elektrisch induktiv, elektrisch kapazitiv oder pneumatisch gemessen wird und damit ein Maß für den Füllstand darstellt.

Auswägemethode. Sie ist auch zur Messung des Füllstands von Schüttgütern geeignet. Dabei wird durch Kraftmeßeinrichtungen unter den Füßen des Behälters das Gesamtgewicht des gefüllten Behälters gemessen.

Die *kapazitive Füllstandsmessung* ist ebenfalls für Flüssigkeiten und Schüttgüter geeignet. Dabei wird die zwischen Meßsonde und Behälterwandung auftretende Kapazität gemessen, die von der Art des Meßguts und dem Füllstand abhängt.

Wassertiefenmessung. *Echolot.* Von einem elektrischen oder magnetischen Bordsender werden Ultraschallimpulse erzeugt, vom Meeresboden reflektiert und von einem Ultraschallempfänger aufgenommen. Die Laufzeit t wird mit einer

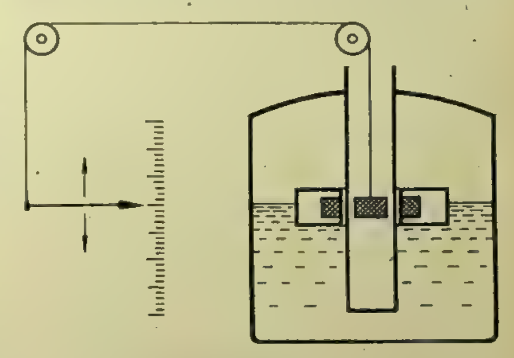
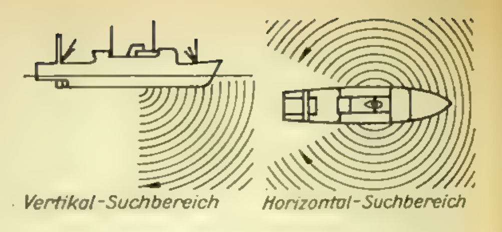


Abb. 13.2.6-1 Füllstandsmessung mit Schwimmer und magnetischem Abgriff

Genauigkeit von ± 2% gemessen. Die Wassertiefe ergibt sich aus $h = (v \cdot t)/2$, wobei die Schallgeschwindigkeit im Wasser mit $v = 1\,500$ m/s eingesetzt wird. Die Tiefe wird beim *Lichtzeigerlot* bzw. *Echometer* durch einen Lichtblitz angezeigt oder beim *Echograf* auf Diagrammpapier registriert. Neben dem reinen *Vertikallot* ist das *Horizontal-Vertikal-Lot* (*HV-Lot*) von besonderer Bedeutung, da mit ihm Fischschwärme aufgespürt werden (Abb. 13.2.6-2).



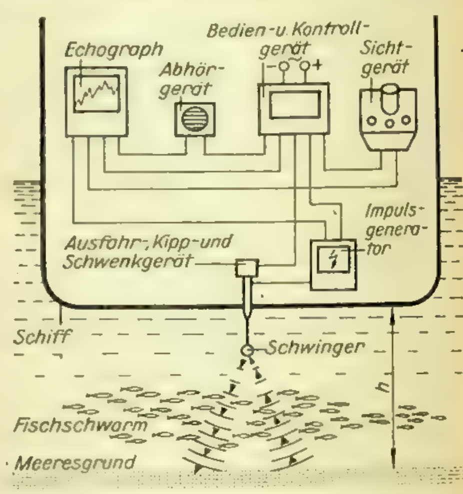


Abb. 13.2.6-2 Suchbereiche und Aufbau eines HV-Lots mit Echograf, Abhorgerät und Fischsichtgerät

13.2.7. Messung von Mengenströmen (Durchfluß)

Bei durch ein Rohr, einen Kanal o. ä. je Zeiteinheit strömenden Flüssigkeits-, Dampf- oder Gasmengen wird entweder das Volumen je Zeiteinheit (Volumenstrommessung) oder die Masse je Zeiteinheit (Massestrommessung) ermittelt.

Volumetrische Verfahren. Durch das Medium werden Meßkammern mit festen oder beweglichen Wänden gefüllt und entleert, die Anzahl dieser diskreten Teilvolumina gezählt und damit die durchgeflossene Menge unmittelbar gemessen (Abb. 13.2.7-1). Bei den mittelbaren volumetrischen Verfahren wird ein mit Schaufeln oder Flügeln versehenes Laufrad durch das strömende Medium in Drehung versetzt. Die Anzahl der Umdrehungen entspricht einem bestimmten Volumen.

Stauverfahren (*Wirkdruckverfahren, Drosselverfahren*). In der Rohrleitung wird durch verschiedenartige Verengungen (*Normblende, Venturidüse*) ein Differenzdruck erzeugt. Er ist ein Maß für den Mengenstrom (quadratischer Zusammenhang) und wird mittels Differenzdruckmanometer (Manometer mit 2 Druckanschlüssen), wie U-Rohr-Manometer, Ringwaage o. ä., gemessen (Abb. 13.2.7-2). Dieses Verfahren ist universell für Flüssigkeiten und Gase, bei beliebigen statischen Drücken, Temperaturen, Stoffeigenschaften und Rohrdurchmessern anwendbar.

Schwebekörperverfahren (*Auftriebsverfahren*). Das Meßmedium durchströmt ein konisches, senkrecht stehendes Meßrohr von unten nach oben, in dem sich ein Schwebekörper befindet, der sich frei auf- und abbewegen kann und dabei einen anderen Öffnungsquerschnitt freigibt. Die Schwebehöhe ist das Maß für den Durchfluß.

Elektrische Verfahren. Beim *induktiven Verfahren* wird entsprechend dem Induktionsgesetz quer zur Strömung eines elektrisch leitenden Mediums in einem Magnetfeld eine elektrische Spannung erzeugt, durch 2 in der Rohrwandung gegenüberliegende Elektroden abgegriffen und nach Verstärkung gemessen. Beim *Hitzdraht-*

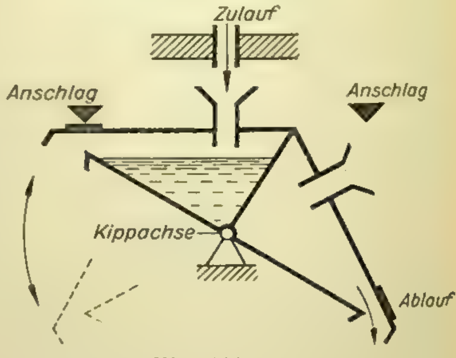


Abb. 13.2.7-1 Kippzähler

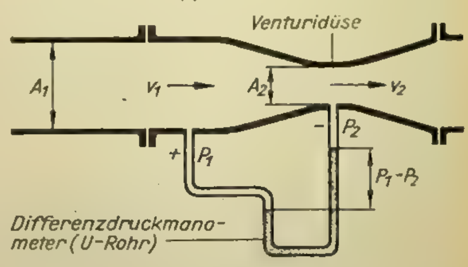


Abb. 13.2.7-2 Mengenstrommessung mit Venturidüse und U-Rohr-Manometer

verfahren wird ausgenutzt, daß sich ein erhitzter Draht bei Umspülung durch Gas in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des strömenden Gases abkühlt. Seine Temperatur und damit der Gasdurchfluß ergibt sich aus dem elektrischen Widerstand, der mittels einer Wheatstoneschen Brückenschaltung gemessen wird (vgl. 13.1.8.).

13.2.8. Temperaturmessung

Die *Temperatur* ist eine Grundgröße des Internationalen Einheitensystem (SI), sie charakterisiert den Wärmezustand eines Stoffes. Die Messung erfolgt entweder durch Berührung, wobei das Meßgut zwecks Temperaturausgleich von einem Meßfühler berührt wird (Thermometer), oder berührungslos, wobei die durch die Temperatur des Meßgutes hervorgerufene Strahlung gemessen wird und als mittelbar wirkende Ersatzgröße dient (Pyrometer).

Mechanische Berührungsthermometer beruhen auf der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften (Länge, Druck, Volumen) verschiedener Stoffe von der Temperatur.

Flüssigkeits-Glasthermometer basieren auf der Temperaturabhängigkeit eines Flüssigkeitsvolumens, das in einem mit Kapillarrohr versehenen Behälter eingeschlossen ist. Die Kuppe der Flüssigkeitssäule in der Kapillare zeigt vor einer Skalenteilung die Temperatur an. Die Ablesbarkeit wird durch farbigen Hintergrund und Linsenwirkung der Kapillare verbessert. Zur Füllung werden benetzende (organische) und für Präzisionsthermometer nicht benetzende Flüssigkeiten (Quecksilber) verwendet. Der Meßbereich ist durch Erstarrungs- und Siedepunkt eingegrenzt.

Stabausdehnungsthermometer. Ein Porzellan- oder Quarzstab befindet sich in einem einseitig geschlossenen Metallrohr. Er überträgt die durch Temperaturänderungen bedingte Längenänderung des Metallrohrs abzüglich der wesentlich geringeren Längenänderung des Stabes auf ein Zeigerwerk, das die Temperatur anzeigt (Abb. 13.2.8-1).

Bimetallthermometer. Temperaturabhängiges Teil ist ein Metallstreifen, der durch Aufeinanderwalzen zweier Metalle mit stark unterschiedlichem Ausdehnungskoeffizienten hergestellt wird. Bei Temperaturänderung erfolgt eine mehr oder weniger starke Krümmung des Bimetalls, die entweder zur Temperaturanzeige oder zur Auslösung eines Schalters verwendet werden kann (z. B. im Reglerbügeleisen).

Dampfdruckthermometer (*Tensionsthermometer*). Ein gebogenes Metallrohr mit elliptischem Querschnitt (Bourdonrohr) ist mit einer leicht siedenden Flüssigkeit teilweise gefüllt. Bei wachsender Temperatur verdampft ein Teil der Flüssigkeit, und die entstehende Druckerhöhung streckt das Bourdonrohr und bewirkt über ein Meßwerk die Temperaturanzeige.

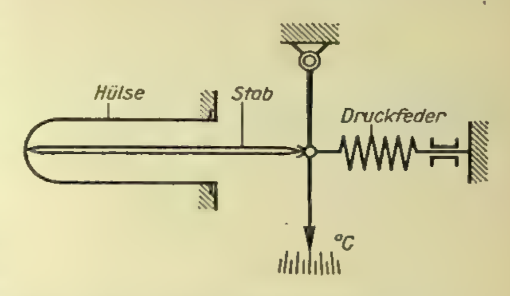


Abb. 13.2.8-1 Stabausdehnungsthermometer

Elektrische Berührungsthermometer nutzen die thermische Abhängigkeit elektrischer Eigenschaften, wie Thermospannung und elektrischer Widerstand, zur Temperaturmessung.

Das *Thermoelement* (thermoelektrisches Thermometer) besteht aus 2 Drähten unterschiedlichen Materials, die an einem Ende, der Meßstelle, miteinander leitend verbunden (verschweißt, gelötet oder geklemmt) sind. An die anderen Enden, die Vergleichsstelle, kann ein Spannungsmeßinstrument angeschlossen werden. Wenn Meß- und Vergleichsstelle unterschiedliche Temperaturen haben, entsteht eine Thermospannung, die dem Temperaturunterschied entspricht und von der Materialpaarung abhängt. Somit kann man bei konstanter Vergleichstemperatur durch Thermospannungsmessung die Meßtemperatur ermitteln. Haben die Anschlußklemmen des Thermoelements keine konstante Temperatur, so muß das Thermoelement durch eine Ausgleichsleitung mit gleichen thermoelektrischen Eigenschaften bis zu einer Stelle gleichmäßiger Temperatur verlängert werden. Kann dies bei genauen Messungen nicht vorausgesetzt werden (Raumtemperaturschwankungen), so muß die Vergleichsstelle künstlich auf konstanter Temperatur gehalten werden. Bei der Messung hoher Temperaturen (über 1000 °C) können Raumtemperaturschwankungen an der Vergleichsstelle jedoch vernachlässigt werden, es ist keine Thermostatierung erforderlich. Thermoelemente erfassen den Bereich −200 bis 1600 °C (kurzzeitig bis 1800 °C).

Widerstandsthermometer. Der Meßeffekt beruht auf der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von Platin- und Nickeldrähten. Platin wird für den Temperaturbereich −220 bis 750 °C, Nickel im Bereich −60 bis 180 °C benutzt. Der Widerstandsdraht ist auf einen Trägerkörper (Zylinder, Quader) aus Glas, Keramik oder Glimmer bifilar aufgewickelt und mittels Bandage oder aufgeschmolzener Deckschicht festgelegt. Er ist meist auf 100 Ω bei 0 °C abgeglichen. Zum Schutz gegen mechanische und chemische Einflüsse sind die Meßwiderstände in Schutzarmaturen eingebaut (Schutzrohr, Anschlußkopf, Ein-

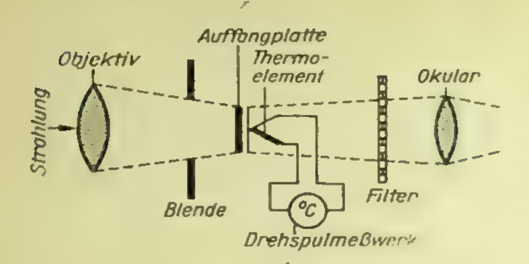


Abb. 13.2.8-2 Gesamtstrahlungspyrometer

baustutzen). Zur meßtechnischen Erfassung der temperaturabhängigen Widerstandsänderung werden meist Brückenschaltungen verwendet. Dabei beeinflußt der Leitungswiderstand die Messung, er muß daher durch einen zusätzlichen Abgleichwiderstand auf einen festen Wert, meist 10 Ω, ergänzt werden.

Pyrometer. Zur Messung hoher Temperaturen wird die vom Meßobjekt ausgehende Strahlung als Maß für dessen Temperatur verwendet.

Gesamtstrahlungspyrometer. Die Strahlung des Meßobjekts wird durch eine Linse (hohe Temperaturen) oder einen Hohlspiegel (niedrige Temperaturen) auf einen Strahlungsempfänger konzentriert, dessen Erwärmung, meist thermoelektrisch gemessen, ein Maß für die Temperatur des Meßobjekts ist (Abb. 13.2.8-2). Eine Blende dient zur Eichung. Durch ein optisches System (Linse, Blende, Filter) ist ein Ausrichten durch den Beobachter auf das Meßobjekt möglich.

Teilstrahlungspyrometer. Aus der vom Meßobjekt ausgesandten Strahlung wird ein enger Wellenlängenbereich ausgefiltert, die Intensität oder Leuchtdichte gemessen und daraus die Temperatur des Meßobjekts ermittelt.

13.2.9. Messung der Feuchte

Der Wasserdampfgehalt der Luft o. a. Gase, die Feuchte, wird mit *Hygrometern* gemessen, die nach unterschiedlichen Meßprinzipien arbeiten.

Hygroskopische Verfahren basieren auf der feuchteabhängigen Längenänderung (Quellung) von Menschenhaar oder synthetischen Fäden, die auf ein Zeigerwerk übertragen wird (Abb. 13.2.9-1).

Absorptionsverfahren. Der Wasserdampf eines strömenden feuchten Gases wird durch ein stark absorbierendes Mittel (z. B. P_2O_5) aufgenommen und mittels Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Die zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts am Absorber zwischen Wasseraufnahme und Austrocknung durch Elektrolyse erforderliche Stromstärke ist ein Maß für die zu messende absolute Feuchte.

Kondensationsverfahren beruhen auf der Tatsache, daß bei Abkühlung eines feuchten Gases eine Wasserdampfsättigung eintritt und bei Unterschreiten dieser Sättigungstemperatur (Taupunkttemperatur) der überschüssige Wasserdampf kondensiert.

Im *Taupunkthygrometer* wird der Kondensationsbeschlag eines Spiegels visuell oder auch fotoelektrisch indiziert und die Taupunkttemperatur elektrisch gemessen (Thermoelement, Halbleiterwiderstand).

Verdunstungsverfahren. Im *Psychrometer* werden 2 gleiche Quecksilberthermometer oder elektrische Widerstandsthermometer, von denen eines mit angefeuchtetem Mull umhüllt ist, von einem Gasstrom umspült. Dabei verdunstet das Wasser am feuchten Thermometer um so stärker, je trockener das Gas ist und die Temperatur sinkt (Verdunstungskälte). Aus der Temperaturdifferenz (psychrometrische Differenz) wird die Feuchte des Gases errechnet oder aus Psychrometertafeln abgelesen.

13.2.10. Analysenmessung

Die Analysenmeßtechnik umfaßt i. allg. die Ermittlung der Zusammensetzung von Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen sowie der physikalischen und chemischen Eigenschaften, z. B. Dichte, Viskosität, pH-Wert, Heizwert, Festigkeit. Beide Gebiete sind miteinander verflochten; so dienen beispielsweise physikalische und chemische Stoffeigenschaften häufig als Meßgröße zur Bestimmung der Stoffzusammensetzung.

Die klassischen Methoden der Stichprobenanalyse wurden – bedingt durch die Notwendigkeit zur Automatisierung – weiterentwickelt in kontinuierliche oder diskontinuierliche Analyseverfahren, bei denen ununterbrochen eine Analyse nach der anderen selbsttätig vorgenommen wird. Oftmals werden zur Analyse von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen die gleichen Meßverfahren angewendet.

Physikalische Verfahren nutzen konzentrationsproportionale Stoffeigenschaften als Meßgröße,

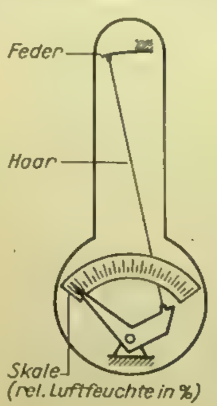


Abb. 13.2.9-1 Haarhygrometer

wie Dichte, optische Brechzahl, elektrische Leitfähigkeit. Dazu gehören auch Wechselwirkungen zwischen Meßgut und Kernstrahlung, wie Strahlungsschwächung, -streuung und Fluoreszenz.
Chemische Verfahren beruhen auf geeigneten chemischen Reaktionen und benötigen ständige Reagenszufuhr, z. B. Titriermittel.
Kombinierte Verfahren untersuchen ein chemisches Reaktionsprodukt mittels physikalischer Methoden.
Gasanalyse. *Kohlendioxidmesser* basieren auf der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit von Kohlendioxid und Luft. 2 gleiche temperaturabhängige Widerstände, einer im Luftstrom, der andere im Meßgasstrom, z. B. Rauchgas, werden durch den gleichen elektrischen Strom aufgeheizt, durch den Kohlendioxidgehalt des Rauchgases jedoch weniger abgekühlt als durch den Luftstrom. Der sich dadurch ergebende Widerstandsunterschied wird mittels einer Brückenschaltung gemessen und ist ein Maß für den Kohlendioxidgehalt des Rauchgases. Die Skale des Meßinstruments ist in „Prozent CO_2" geeicht.

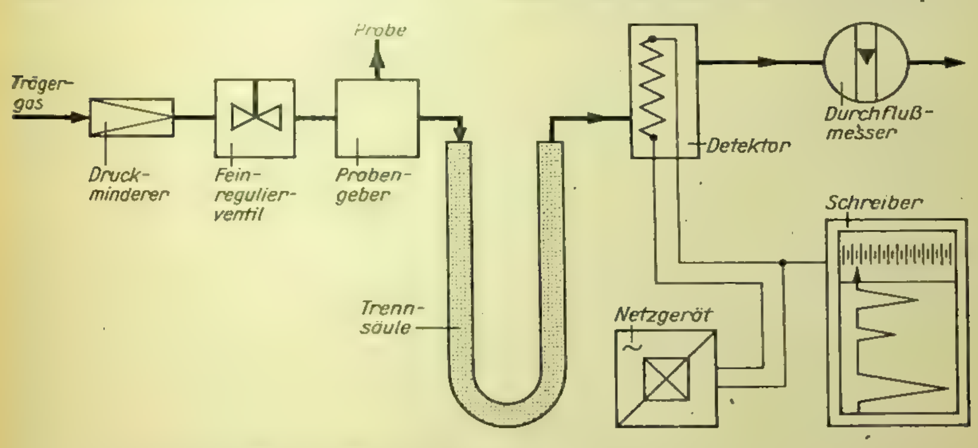


Abb. 13.2.10-1 Prinzip eines Laborgaschromatografen

Gaschromatograf. Er dient zur Ermittlung der einzelnen Bestandteile eines Gasgemischs. Das Meßprinzip besteht darin, daß die verschiedenen Gaskomponenten eines bestimmten Volumens Meßgas durch ihre unterschiedliche Verweildauer in einer Trennsäule zunächst voneinander getrennt und anschließend die Teilvolumina in einem Detektor getrennt voneinander gemessen werden. Dazu wird bei einem Laborgaschromatograf (Abb. 13.2.10-1) einer Druckflasche ein Trägergas (Wasserstoff, Stickstoff, Argon, Helium) entnommen und ein definierter Trägergasstrom eingestellt. Mittels des Probengebers wird eine abgemessene Meßgasprobe in den Trägergasstrom gebracht. Dieses Gemisch gelangt in ein Glas-, Kupfer- oder Stahlrohr von 3 bis 7 mm Durchmesser und 1 bis 15 cm Länge, die sog. *Trennsäule*, die mit Kieselgel, Aktivkohle o. ä. Material gefüllt ist. Am Ausgang der Trennsäule erscheinen in zeitlichem Abstand die einzelnen Meßgaskomponenten als Beimischung zum Trägergas und werden vom Detektor, z. B. nach dem Wärmeleitfähigkeitsprinzip ähnlich dem Kohlendioxidmesser, gemessen. Ein angeschlossener Schreiber macht dies sichtbar, wobei der Flächeninhalt unter der Meßkurve (Peaks) der Konzentration der jeweiligen Komponente entspricht. Automatisch arbeitende Gaschromatografen nehmen täglich 200 bis 3000 Proben. Die Auswertung der Meßergebnisse erfolgt elektronisch (Integration, Summation, Division) mit dem Ziel, den prozentualen Anteil der einzelnen Komponenten des Meßgases ständig anzuzeigen.
Kalorimeter dienen zur Ermittlung des Heizwerts von Brenngasen. Dabei wird ein definierter Gasstrom verbrannt und mit der entstehenden Wärmeleistung ein definierter Wasserstrom erwärmt. Aus der daraus resultierenden Temperaturdifferenz kann man auf den Heizwert des Gases schließen, wenn man dafür sorgt, daß sich Gas-, Verbrennungsluft- und Wassertemperatur vor der Verbrennung angleichen können und die entstehende Verbrennungswärme vollständig an den Wasserstrom abgegeben wird.
Flüssigkeitsanalyse. *Konduktometrie* (Konzentrationsmessung) nutzt die Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von der Konzentration. Eine spezielle Leitfähigkeitszelle dient zur Messung des elektrischen Widerstands der durch die Leitfähigkeitszelle an 2 Elektroden vorbeiströmenden Flüssigkeit. Durch Eichung der Meßzelle mit ausgemessenen Substanzen, i. allg. wird Kaliumchloridlösung verwendet, ermittelt man den konstruktiv bedingten Zusammenhang zwischen Widerstand und spezifischer Leitfähigkeit (Konzentration).

pH-Wert-Messung. Der Gehalt an Wasserstoffionen (cH) einer wäßrigen Lösung kann $\approx 10^{-9}$ bis 10^{-2} Mol/l betragen. Der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration, der *p*H-Wert ($pH = -\log cH^+$) gibt an, ob die Lösung sauer (*p*H-Wert < 7), neutral (*p*H-Wert $= 7$) oder basisch (*p*H-Wert > 7) reagiert. Am einfachsten läßt sich der *p*H-Wert mit Indikatoren ermitteln, d. h. chemischen Stoffen, die, mit der zu analysierenden Lösung zusammengebracht, ihre Farbe in Abhängigkeit vom *p*H-Wert ändern.

In der MSR-Technik (vgl. 14.1.1.) wird die *pH-Meßzelle* verwendet, die mittels der Bezugs-, Ableit- und Meßelektrode eine elektrische Spannung gewinnt. Als Meßelektrode wird eine Glas-, Metalloxid- oder Wasserstoffelektrode verwendet. Diese Spannung ist eine logarithmische Funktion der Wasserstoffionenkonzentration. Sie wird über einen Verstärker mit hohem Eingangswiderstand (10^{12} bis $10^{14}\,\Omega$) und sehr hoher Stabilität an einem Anzeigegerät als *p*H-Wert angezeigt.

Feststoffanalyse. Die Zusammensetzung von Feststoffen wird vorzugsweise durch physikalische Verfahren ermittelt, hauptsächlich mit der *Röntgenfluoreszenzanalyse.* Dazu wird ein Teil des zu untersuchenden Feststoffs (z. B. Erze) gemahlen und zu Probekörpern gepreßt. Diese werden dem Röntgenspektrometer zugeführt, zur Emission der charakteristischen Röntgenstrahlung angeregt und die Intensität der ausgesandten Spektrallinien quantitativ unter Einsatz von Rechnern ausgewertet. Besonders bei Metallen, wo auf die oben beschriebene Probenaufbereitung verzichtet werden kann, bietet dieses zerstörungsfreie Analyseverfahren besondere Vorteile.

Universelle Verfahren für Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase. *Refraktometer.* Die Brechzahlen von Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen sind charakteristisch für deren Konzentration, z. B. für den Fettgehalt der Milch, den Alkoholgehalt von Flüssigkeiten und den Zuckergehalt von Früchten. Refraktometer messen die Brechzahlen, indem Glasprismen bekannter Brechzahlen als Normale mit der zu untersuchenden Substanz verglichen werden.

Fotometer. Die Lichtabsorption in Flüssigkeiten und Gasen steht in einem bestimmten Zusammenhang zur Konzentration der absorbierenden Komponente (Lambert-Beersches Absorptionsgesetz). Beim *Zweistrahlfotometer* gelangt das Licht einmal durch das Meßgut zum Lichtempfänger und zum anderen durch das Vergleichsgut (reines Lösungsmittel bzw. Trägergas) zu einem zweiten Lichtempfänger. Das so gewonnene Differenzsignal ist ein Maß für die unterschiedliche Lichtabsorption und somit für die Konzentration des Meßgutes.

13.2.11. Messung von Strahlungsgrößen

Strahlung ist eine Form der Energieausbreitung durch Wellen oder Teilchen. Von besonderer Bedeutung ist die elektromagnetische Wellenstrahlung im Bereich des sichtbaren Lichts, der Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- und γ-Strahlung sowie die α- und β-Strahlung (Teilchenstrahlung).

Lichtelektrische Empfänger. *Fotozelle.* Durch Lichtstrahlung werden bei dieser speziellen Art der Elektronenröhre Elektronen aus der Katode (Fotokatode) freigesetzt, die von der gegenüberstehenden Anode unter Einfluß eines elektrischen Feldes abgesaugt werden. Die Stärke des entstehenden Fotostroms ist der Beleuchtungsstärke bzw. dem auf die Katode auftreffenden Lichtstrom proportional. Eine Vergrößerung des Meßeffekts gegenüber Vakuumfotozellen erreichen die mit einem Edelgas gefüllten Fotozellen durch das Entstehen von ionisierten Gasatomen und Sekundärelektronen.

Fotoelement. Bei Bestrahlung von Fotoelementen erzeugen diese aus einem Bruchteil der absorbierten Strahlungsleistung eine elektrische Spannung von einigen Hundert Millivolt. Fotoelemente sind im Prinzip Halbleitergleichrichter.

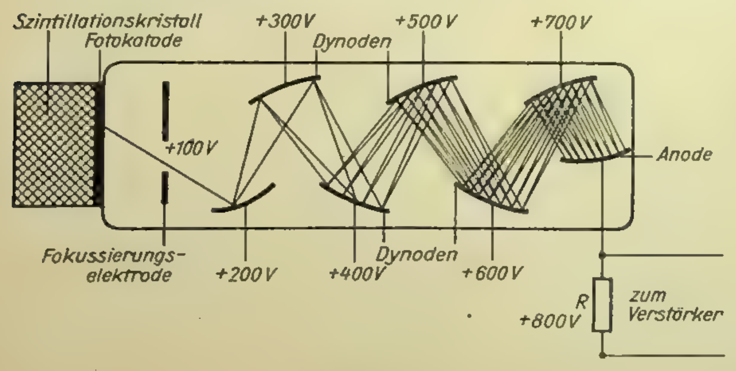


Abb. 13.2.11-1 Prinzip des Sekundärelektronenvervielfachers

Der bei Bestrahlung erzeugte Strom fließt in Sperrichtung. Die größte technische Bedeutung haben Fotoelemente auf der Basis von Silizium, Selen und Germanium erlangt; weitere Fotoelemente bestehen u. a. aus Galliumarsenit, Silbersulfid, Kupferoxydul.

Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) (Abb. 13.2.11-1). Ähnlich der Fotozelle werden durch Bestrahlung der Fotokatode Elektronen freigesetzt und im elektrischen Feld beschleunigt. Sie treffen auf die erste *Dynode* (*Prallblech*) auf und setzen dort weitere Elektronen (Sekundärelektronen) frei. Durch weiteres Beschleunigen und Aufprallen auf weitere Dynoden wächst die Zahl der Sekundärelektronen lawinenartig an. Dieses Meßprinzip ermöglicht es, sehr schwache Lichterscheinungen durch einen Fotostrom zu messen. SEV werden wegen ihrer hohen Empfindlichkeit auch zum Nachweis und zur Messung radioaktiver Strahlung benutzt.

Fotohalbleiter. Fotowiderstände, -transistoren, -feldeffekttransistoren und -thyristoren (vgl. 11.5.3.) sind weitere lichtelektrische Empfänger. Sie werden nicht nur zur Messung lichttechnischer Größen (Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte), sondern auch zur berührungslosen Messung vieler anderer Größen benutzt, z. B. Temperaturmessung (Pyrometer), Längen- und Dickenmessung sowie zum Auslösen von Schaltvorgängen und Warnsignalen (Feuerwarneinrichtungen; vgl. 11.4.9.).

Strahlungsdetektoren sind Strahlungsmeßfühler für Kern- und Röntgenstrahlung. Sie nutzen Anregungs- und Ionisationseffekte, z. B. die unmittelbare Ionisation durch α- und β-Strahlung (Kernstrahlung) sowie die über Sekundärelektronen ausgelöste mittelbare Ionisation bei γ-Strahlung und Röntgenstrahlung (elektromagnetische Strahlung).

Geiger-Müller-Zählrohr. In einem abgeschlossenen gasgefüllten Zylinder, z. B. einem Glaszylinder mit metallischem Innenbelag, ist ein Draht isoliert ausgespannt. Draht und Metallbelag bilden 2 Elektroden, an die eine hohe Gleichspannung, z. B. 1,5 kV, angelegt ist. Durch eindringende Korpuskeln (β-Strahlung) oder Quanten (γ-Strahlung) werden Teile der Gasfüllung ionisiert und einzelne Stoßentladungen ausgelöst. Die Entladungen werden angezeigt oder hörbar gemacht. Aus ihrer Häufigkeit kann auf die Strahlungsstärke geschlossen werden.

Ionisationskammer. Wie beim Geiger-Müller-Zählrohr beruht das Meßprinzip auch hier auf der Ionisation eines Gases (z. B. Luft, Argon) und der Messung des sehr kleinen Ionisationskammerstroms ($\approx 10^{-13}$ A). Die Ionisationskammer ist mit einem Eintrittsfenster versehen, das durch eine dünne Folie verschlossen ist. Es kann im Unterschied zum Geiger-Müller-Zählrohr neben β- und γ- auch α-Strahlung gemessen werden.

Szintillationszähler. Die zu messende Strahlung trifft auf einen Kristall und löst dort schwache Lichtblitze aus. Diese werden durch einen empfindlichen lichtelektrischen Empfänger, z. B. einen Sekundärelektronenvervielfacher, nachgewiesen.

13.2.12. Digitale Meßtechnik

Die meisten bisher angewandten Meßgeräte liefern analoge Ausgangssignale als Meßinformation (vgl. 11.4.1.). Zur Erfassung, Registrierung, Weiterverarbeitung, Auswertung und Übertragung von Meßinformationen dienen jedoch in zunehmendem Maße Digitalrechenautomaten, insbesondere Prozeßrechner, wenn die Meßinformation zur Steuerung von Prozessen herangezogen wird. Die analogen Meßsignale müssen deshalb in digitale Meßsignale umgesetzt werden (*Digitalisierung, Quantisierung*). Man verwendet dazu *Analog-Digital-Umsetzer* (*ADU*). In diesen Geräten wird, oft unter Verwendung integrierter Schaltkreise, speziell von Mikroprozessoren, das analoge Meßsignal in bestimmten Zeitintervallen in ein Binärsignal kodiert. Dazu wird z. B. der analoge Wert der Meßgröße mit einem diskreten Wert, der als Normal dient, verglichen, und festgestellt, wie oft dieser diskrete Wert im analogen Wert enthalten ist. Das Zählergebnis wird binärkodiert ausgegeben, es kann dann unmittelbar von digital arbeitenden Schaltungen, Geräten usw. weiterverarbeitet werden. Es gibt z. B. Analog-Digital-Umsetzer, die nach Binär-Dezimal-Umsetzung das Meßergebnis z. B. auf Displays mit Siebensegmentanzeigeelementen darstellen. Ist die Eingangsgröße eine Spannung, so spricht man von *Digitalvoltmetern*. Moderne Digitalmeßgeräte schalten rechnergestützt auch den Meßbereich um, so daß eine Überlastung innerhalb weiter Grenzen praktisch unmöglich ist.

13.2.13. Frequenzanaloge Meßtechnik

Wegen der Einfachheit der Übertragung von Meßsignalen, bei denen die Frequenz ein Maß für den Meßwert darstellt, und wegen der im Vergleich zur Übertragung analoger Meßsignale störungsärmeren Möglichkeit der Fernübertragung verwendet man Meßfühler, die eine Frequenz abgeben, deren Wert den Wert der Meßgröße abbildet. Beispielsweise ist die Frequenz eines nicht temperaturkompensierten Oszillators von der Temperatur abhängig. Nachdem die Abhängigkeit nötigenfalls durch spezielle Schaltungen linearisiert ist, wird das so gewonnene Meßsignal fernübertragen. An entfernter Stelle wird die Frequenz „gezählt", d. h. die Anzahl der Schwingungen in definierten Zeitintervallen bestimmt, digital angezeigt oder ausgewertet.

13.3. Werkstoffprüfung

Für die Berechnung und zum Bau von Maschinen, Geräten und ihren Elementen müssen zur Ermittlung der optimalen Lösung Kenngrößen der zu verwendenden Werkstoffe bekannt sein, die qualitativ und quantitativ das Verhalten des Materials im vorgesehenen Belastungsfall beschreiben. Es kann sich hierbei um mechanische, thermische, elektrische, magnetische, optische, korrosive u. a. Beanspruchungen handeln, die überdies meist noch kombiniert auftreten.
Die Werkstoffprüfung untersucht, ob die verwendeten Materialien die vorausgesetzten Werte tatsächlich aufweisen. Hieraus folgen die Aufgaben der Werkstoffprüfung:
– Überprüfung der erwarteten Eigenschaften (*Qualitätsprüfung*).
– Überprüfung auf eigenschaftsmindernde Fehler (*Fehlerprüfung*).
Wegen der unübersehbar großen Vielfalt der zu überwachenden Materialgrößen haben sich im Laufe der Zeit viele Prüfverfahren entwickelt, wobei man grundsätzlich 2 Verfahrensgruppen unterscheiden kann: die nichtzerstörungsfreien und die zerstörungsfreien Prüfverfahren.

13.3.1. Nichtzerstörungsfreie Prüfverfahren

Der Werkstoff wird hierzu als Stichprobe entnommen und meist in standardisierten Probenformen der vorgesehenen Belastung – zumindest bis zur irreversiblen Veränderung – ausgesetzt. Man erhält hier absolute, d. h. mit physikalischen Grundgrößen direkt verbundene Werte, die oft eindeutig auf andere Parameter des Stoffs bezogen werden können. Darin liegt auch die große Bedeutung dieser Verfahrensgruppe, da sie Kalibrierverfahren aufweist, an denen die Anzeige anderer orientiert werden kann. Die Objekte sind nach dem Prüfen nicht weiterhin zu verwenden, da ihre Eigenschaften sich grundlegend – bis zur Zerstörung der Probe – verändert haben.
Entsprechend dem zeitlichen Verlauf der – meist mechanischen – Einwirkung unterscheidet man statische, dynamische und Impulsbelastung.
Chemische und spektralanalytische Prüfverfahren. Chemische Prüfverfahren gestatten, die *Zusammensetzung*, z. B. bei Legierungen, und im begrenzten Umfang *Verunreinigungen* qualitativ und quantitativ festzustellen. Mit den sog. *naßchemischen Analysen* kann man noch 10^{-4} g Probenmasse erfassen. Für eine chemische Untersuchung sollten ≈ 1 bis 5 g der Substanz völlig gelöst werden. Anschließend wird diese Lösung in einem festliegenden Trennungsgang durch die Zugabe bestimmter Chemikalien in geeignete Ionengruppen geteilt, innerhalb der sich dann charakteristische Reaktionen der Elemente qualitativ erfassen lassen.
Diese Verfahren lassen sich zur quantitativen Aussage verfeinern. Hierbei unterscheidet man Gewichtsanalysen, Maßanalysen, kalorimetrische Verfahren, Coulometrie, potentiometrische Titrationen, Polarografie u. ä. Die Auswahl wird hier sowohl nach Gesichtspunkten der Nachweisgenauigkeit und vor allem der Möglichkeit, subjektive Einflüsse auszuschalten, getroffen. Bei der *Maßanalyse* wird z. B. aus einer Bürette die Menge Prüflösung zugetropft, bis ein Farbumschlag, eine Trübung oder eine andere charakteristische Veränderung der Flüssigkeit erkennbar ist. Dieser Punkt wird bei der *potentiometrischen Titration* durch Umschlagen des elektrochemischen Potentials objektiv und quantitativ angezeigt. Die benötigte Menge Titrationsflüssigkeit gestattet die Angabe der Menge des nachzuweisenden Stoffs.
Die *spektralanalytischen Verfahren* beruhen darauf, daß ein sehr kleiner Teil des zu prüfenden Materials durch eine elektrische Funken- oder Bogenentladung verdampft wird, deren Licht durch die vorhandenen chemischen Elemente charakteristisch gefärbt erscheint. Ein im Strahlengang befindliches optisches Gitter oder *Prisma* zerlegt dieses Licht in seine Wellenlängen (Abb. 13.3.1-1). Dieses so erhaltene *Spektrum* wird fotografisch registriert und läßt die Elemente qualitativ und quantitativ ermitteln. Je höher die Konzentration eines Elements ist, um so größer ist die Intensität der ihm zuzuordnenden Linien im Spektrum. Hieraus ist quantitativ auf die enthaltene Menge (in Prozent) zu schließen. Bei Konzentrationen über 2% bestehen in der Regel Schwierigkeiten bei der quantitativen *Spektralanalyse*. Der Hauptanwendungsbereich dieser Analysenmethode, die bis zum Nachweis von Spuren einsetzbar ist, liegt deshalb bei Konzentrationen < 2%.
Metallografie. Unter dem Begriff Metallografie versteht man das Gebiet der Metallkunde, das sich mit dem Zusammenhang zwischen dem Aufbau des *Gefüges* (der meist kristalline, mikroskopische Bau der Werkstoffe) einerseits und den *Zustandsdiagrammen* sowie den Eigenschaften der Stoffe andererseits befaßt. Die metallografischen Verfahren gestatten, die laufende Produktion oder bei Forschungsaufgaben das

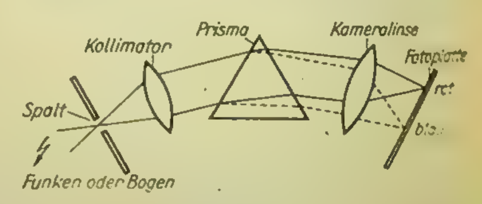


Abb. 13.3.1-1 Schema des Strahlengangs in einem Prismenspektrografen

Material in Stichproben auf *Materialverwechslung, Verarbeitungsfehler, Schadensursachen*, Ausmessen bestimmter Einzelheiten (z. B. die Dicke einer Veredlungsschicht), Bindungszustände u. ä. zu überwachen.
Zur Herstellung des *metallografischen Schliffs* muß die Probe aus dem Material oder dem Teil an der interessierenden Stelle vorsichtig entnommen werden, d. h. ohne zusätzliche Erwärmung oder Verformung. Die Größe dieses Schliffs sollte nach Möglichkeit 1 bis 5 cm Kantenlänge oder Durchmesser betragen. Kleinere Teile, wie Nadeln, Wälzlagerteile, Drähte o. ä., müssen entweder in einem Schliffhalter gespannt oder in Epoxidharz eingegossen werden.
Durch das Schleifen auf Korundpapier erhält die Probe eine ebene Fläche, die anschließend mit einer Aufschlämmung von sog. *Poliertonerde* (Al_2O_3-Pulver der Korngröße 1 bis 10 μm), Diamantpulverpasten o. a. bearbeitet wird. Das ebene, fein polierte Teil muß meist noch chemisch geätzt werden, damit die erwarteten Einzelheiten erkannt und ausgewertet werden können. Der Polier- und Ätzprozeß läßt sich auch elektrochemisch ausführen.
Zur Beurteilung des Schliffs benutzt man vergrößernde licht- oder elektronenoptische *Mikroskope*. Bei der mit ihnen erhaltenen Abbildung interessiert vor allein, um welchen Faktor das Objekt vergrößert gesehen oder abgebildet wird, bzw. das *Auflösungsvermögen*, das den kleinsten Abstand der noch getrennt erkennbaren Objekt-Einzelheiten angibt (vgl. 12.3.3.).
Die Anwendung von Strahlung mit kürzerer Wellenlänge – z. B. Ultraviolettlicht – führt auch nicht zu einer grundsätzlichen Erweiterung der Auflösung, wie dies beim Elektronenmikroskop der Fall ist. Dieses Gerät setzt aber i. allg. für die Durchstrahlung Objekte voraus, die sehr dünn sein müssen und eine besondere Präparation erfahren haben. So lassen sich nur dünne Abdrücke aus organischen Lacken oder der Oxidhaut vergrößert abbilden, nachdem ein hauchdünner Wolfram- oder Goldfilm zur Kontraststeigerung aufgedampft wurde. Man erhält daher kein direktes Bild von dem für eine Durchstrahlung mit Elektronen zu dicken Objekt, sondern nur von dessen Oberfläche. Dies bietet aber schon oft einen beträchtlichen Informationsgewinn.
In einem *Emissions-Elektronenmikroskop* wird die Probenoberfläche durch den Beschuß mit Elektronen oder Ionen bzw. durch Erhitzen der Probe auf hohe Temperatur zur Emission von Elektronen angeregt. Die Intensitätsverteilung dieser sekundär erzeugten Ladungsträger auf der Oberfläche wird elektronenoptisch sehr stark vergrößert auf dem Leuchtschirm oder der Fotoplatte abgebildet. Das Auflösungsvermögen, das bei Lichtmikroskopen ≈ 0,5 μm betragen kann, wird z. Z. für Durchstrahlungsaufnahmen mit max. 0,3 nm, für Emissionsaufnahmen mit

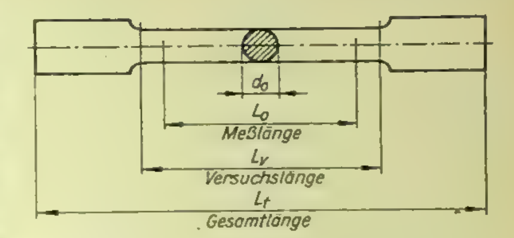


Abb. 13.3.1-2 Probestab zur Zugfestigkeitsprüfung nach TGL 0-50125

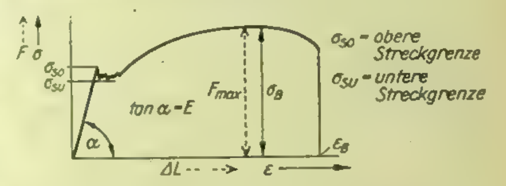


Abb. 13.3.1-3 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

1 nm angegeben. Daher sind hier die hohen Vergrößerungen sinnvoll.
Beim *Rasterelektronenmikroskop* bzw. der *Mikrosonde* wird die Probenoberfläche mit einem feinst gebündelten Elektronenstrahl – unter 0,1 μm Durchmesser – in Zeilen wie beim Fernsehbild abgetastet. Jede getroffene Stelle wird dadurch eine ihr eindeutig zuzuordnende Information (z. B. über Stoffart, Kristallstruktur, Verunreinigungen u. ä.) liefern in Form von Sekundärelektronen, charakteristischer Röntgenstrahlung u. a. Diese sekundäre Emission wird analysiert und das Ergebnis synchron mit dem Abtastvorgang auf einem Bildschirm als Intensitätssignal wiedergegeben. Das Auflösungsvermögen wird durch den Durchmesser des primär anregenden Elektronenstrahls bestimmt. Es liegt im Bereich von 1 bis 0,15 nm.
Zug-, Druck- und Biegeprüfung. Die Krafteinwirkung auf ein Werkstück hat eine entsprechende Gestaltsänderung zur Folge, der aber der Werkstoff einen Widerstand entgegensetzt. Bei statischen Prüfverfahren wird die Belastung langsam und stoßfrei anwachsend aufgebracht. Je nach Art der Krafteinwirkung unterscheidet man Zug-, Druck-, Biege-, Torsions- u. a. Versuche.
Im *Zugversuch* wird das Werkstoffverhalten bei einachsiger, über den gesamten Probenquerschnitt homogen verteilter Zugbeanspruchung untersucht. Hierzu wird ein Probestab aus dem betreffenden Material in die Einspannbacken einer Prüfmaschine eingesetzt (Abb. 13.3.1-2) und kontinuierlich mit max. 10 N/mm² in der Sekunde gedehnt, bis der Bruch eintritt. Die Maschine zeichnet auf einem Papierstreifen den Zusammenhang zwischen der Verlängerung

$L - L_0 = \Delta L$ und der vom Material gegen diese Verformung ausgeübte Kraft F auf (Abb. 13.3.1-3).
Aus der Steigung des linearen Anfangsteils, in dem es nur zu *elastischen Formänderungen* kommt, kann man den Winkel α zwischen Abszisse und Kurve entnehmen, der mit dem *Elastizitästsmodul E* nach der Beziehung $\tan\alpha = E\,[(F/A_0)\cdot L_0/(L - L_0)]$ verbunden ist. Die Ursache für das Abweichen von dieser linearen Kurve ist in Vorgängen zu finden, die Veränderungen im Kristallaufbau der Stoffe bewirken. Es gleiten dann atomare Bereiche gegeneinander und kehren nicht wieder in die ursprüngliche Lage zurück. Dies nennt man *plastische Verformung*. Während des Zugversuchs kann man dies an Veränderungen der Probenoberfläche und an der beginnenden *Einschnürung* erkennen. Dort steigt dann die einwirkende Kraft pro Flächeneinheit des Querschnitts stärker an als an anderen Stellen des Stabes. Hier wird auch der Bruch des Materials auftreten. Die höchste Kraft F_{max}, die der Stab aushält, liefert – bezogen auf den Ausgangsquerschnitt A_0 – die *Zugfestigkeit* $\sigma_z = F_{max}/A_0$.
Abb. 13.3.1-4 zeigt 5 typische Kraft-Verlängerungs-Schaubilder von technisch bedeutsamen Werkstoffen.
Der *Druckversuch* führt zu einer Stauchung, d. h. einer Verkürzung der Probenachse. Die größte Schubbeanspruchung tritt in einer unter 45° zur Probenachse geneigten Ebene auf, auf die die sich ausbildende tonnenförmige Ausbuchtung der zuvor zylindrischen Probe zurückzuführen ist (Abb. 13.3.1-5). Als Folge des mehrachsigen Beanspruchungszustands treten sog. Rutschkegel auf. Wie beim Zugfestigkeitsprüfverfahren liefert die Höchstkraft beim Bruch die Druckfestigkeit.

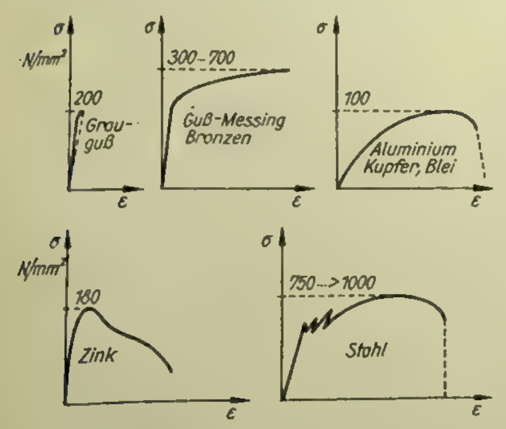


Abb. 13.3.1-4 Typische Spannungs-Dehnungs-Schaubilder

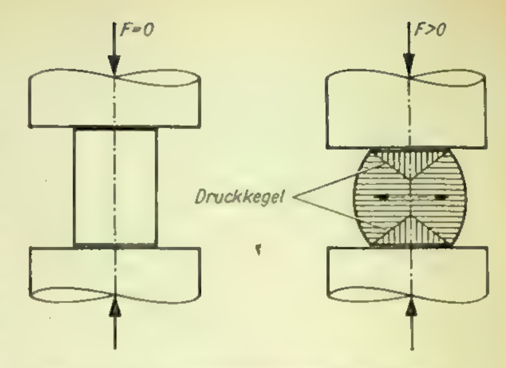


Abb. 13.3.1-5 Spannungsverteilung in der Druckprobe (Druckkegel)

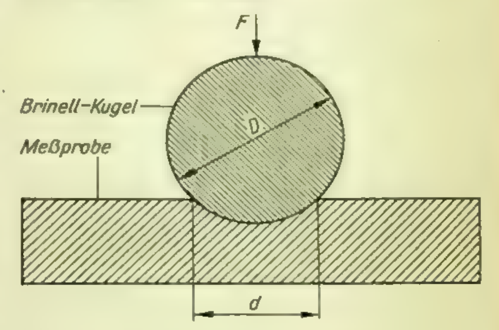


Abb. 13.3.1-6 Härteprüfung nach dem Brinellverfahren

Bei der *Biegebeanspruchung* treten sowohl Zug- als auch Druckbeanspruchungen auf mit einer „*neutralen Faser*" in der Mitte des Querschnitts der meist stabförmigen Probe. Die sehr starke Formabhängigkeit dieses Verfahrens erschwert die Verallgemeinerung der Meßergebnisse auf Objekte anderer Gestalt. Man prüft vorwiegend spröde Stoffe mit dieser Methode.
Härtemessung. Als Härte bezeichnet man den Widerstand, den ein Material dem Eindringen eines härteren Körpers entgegensetzt. Die Härtemeßverfahren unterscheiden sich nach der Form des *Eindringkörpers* (Kugel, Pyramide, Kegel o. ä.) und der Art, wie die Last aufgebracht sowie der plastische Eindruck ausgemessen wird.
Beim *Brinellverfahren* wird eine Stahlkugel vom Durchmesser D mit einer Prüfkraft $F \approx 10$ s in die Prüfoberfläche eingedrückt (Abb. 13.3.1-6). Der bleibende Eindruck in Form einer Kugelkalotte A vom Durchmesser d liefert den Härtewert nach der Formel $HB = 2F/\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2}) = F/A$.
Die Prüfkräfte F und die Kugeldurchmesser D sind genormt. Dieses Verfahren hat sich besonders für nichtgehärtete Stähle u. a. weiche Stoffe bewährt.
Empirisch wurde eine Proportionalität zwischen der Brinellhärte und der Zugfestigkeit festgestellt mit einem materialspezifischen Faktor 0,3, $\sigma_z = 0{,}3\,HB$.

Der Eindringkörper des *Vickersverfahrens* ist eine Diamantpyramide, bei der 2 sich gegenüberliegende Flächen einen Winkel von 136° einschließen. Sie bilden nach Abb. 13.3.1-7 die Tangentialflächen an der Brinellkugel in der Ebene der Oberfläche bei der Eindrucktiefe im Bereich optimaler Meßempfindlichkeit bei $d = 0{,}375\ D$. Von dem in der Draufsicht quadratischen Eindruck mißt man die Diagonale d aus und berechnet die Vickershärte HV nach der Formel $HV = 1{,}8544\ F/d^2$.

Im Gegensatz zu anderen Härtemeßverfahren ist hier der ermittelte Härtewert bei unterschiedlich großen Kräften F gleich. Man arbeitet in der Regel mit $F = 30$ bis 300 N und erfaßt hiermit sowohl weiche als auch harte Werkstoffe.

Zunehmend an Bedeutung erlangt das *Kleinlast-Härtemeßverfahren* mit $F = 2$ bis 30 N wegen der kleineren Eindrücke, die fast nicht die Oberfläche „beschädigen" und auch dünnere Schichten messen lassen. Diese Vorteile sind beim *Mikro-Härtemeßverfahren* noch ausgeprägter, bei dem $F < 2$ N angewendet werden. Der mit einem Mikroskop auszumessende d-Wert gestattet auch, die Härte einzelner Gefügebestandteile zu erfassen.

Beim *Rockwellverfahren* dringt eine Stahlkugel oder ein Diamantkegel zunächst durch die Vorlast 100 N, dann zusätzlich durch 1400 N in die Oberfläche ein. Die Eindringtiefe mißt man in Rockwelleinheiten $e = 2\ \mu m$ und erhält dann $HR = 100 - e$.

Allgemeingültige Umrechnungsformeln, -tabellen oder -diagramme konnten bisher nicht gefunden werden, so daß ein Vergleich nur relativ zulässig erscheint.

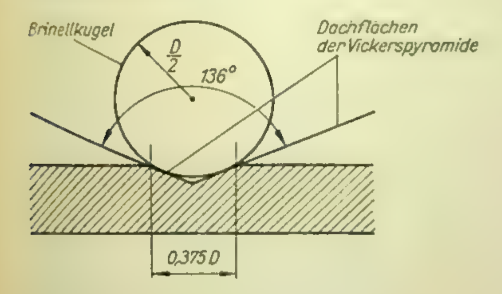


Abb. 13.3.1-7 Härteprüfung nach dem Vickersverfahren im Vergleich zum Brinelleindruck

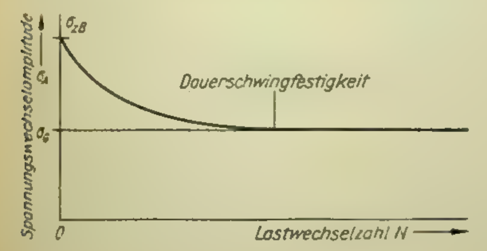


Abb. 13.3.1-8 Wöhlerkurve

Dynamische Prüfungen. Die Reaktion der Werkstoffe auf dynamische Belastungen ist für die Technik von zunehmender Bedeutung. Eine wichtige Größe, die *Dauerschwingfestigkeit*, ermittelt man durch eine schwingende Belastung mit sinusförmigem Spannungswechsel bei steigender Amplitude. Hierbei wird die Zahl N der Lastwechsel notiert, die zum Bruch führten. Das entsprechende Diagramm (Abb. 13.3.1-8), die sog. *Wöhlerkurve*, geht von der Zugfestigkeit bei der Lastwechselzahl $N = 0$ aus. Dann fallen die Amplituden σ_A bei höheren N-Werten und nähern sich schließlich fast asymptotisch der Dauerschwingfestigkeit als Grenzbelastung unter unendlich vielen Lastwechseln.

Um die Vielfalt der in der Technik auftretenden Belastungen durch Prüfung zu erfassen, werden sowohl die Lastwechselfrequenz, die Kurvenform (z. B. Impulsform) und die Temperatur variiert.

13.3.2. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Durch eine zerstörungsfreie Prüfung erfährt der Werkstoff keinerlei Veränderungen, man kann daher alle Werkstücke vor und während der Bearbeitung erfassen. Viele dieser Verfahren sind automatisierbar und erfordern nur äußerst kurze Meßzeiten (unter 0,1 s). Teile mit sehr hohen Material- und Fertigungskosten gehen nicht verloren, man kann einen aufgefundenen Fehler in Intervallen erneut prüfen und so überwachen.

Die nachstehend behandelten Verfahren sind ausgewählt aus der großen, vielseitigen Gruppe der zerstörungsfreien Prüfmethoden, die ständig mit neuen Erkenntnissen der Grundlagenwissenschaften wächst.

Radiografische Verfahren. Man verwendet die *Röntgen-* und *Gammastrahlung* wegen ihrer starken Durchdringungsfähigkeit zum Prüfen von festen, undurchsichtigen Stoffen und erhält dabei Aufschluß über das Innere der Werkstücke durch die unterschiedliche Schwächung der Strahlung im Material entsprechend dessen Wanddicke und Dichte. Die stets geradlinige Ausbreitung dieser Strahlungen gestattet gut die quantitative Auswertung der Durchstrahlungen. *Elektronen-* und *Neutronenstrahlung* können hier eine selten erforderliche, aber gegebenenfalls bedeutsame Ergänzung liefern.

Bei diesen *Grobstruktur-Untersuchungen* wird das Prüfobjekt durchstrahlt (Abb. 13.3.2-1). Es schwächt durch die Wanddicke die Intensität des Strahlungsfelds, was mit Hilfe des *Röntgenfilms*, *Leuchtschirms* oder *Zählrohrs* dargestellt wird. So machen sich *Inhomogenitäten*, wie Fehler oder gefährlich geringe Wanddicken, bemerkbar, deren Tiefenlage durch *Stereoaufnahmen* ermittelt werden kann.

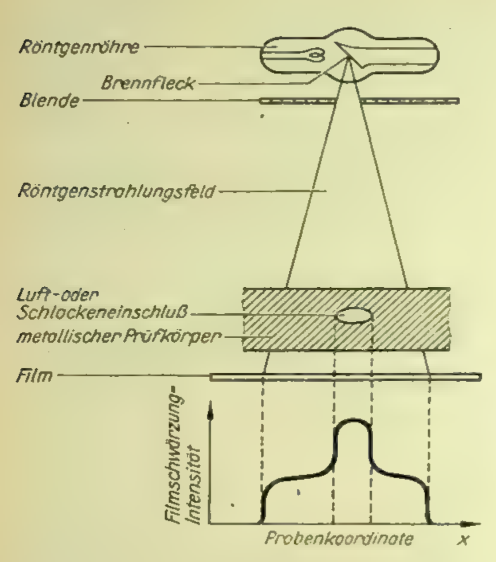


Abb. 13.3.2-1 Durchstrahlungsanordnung für Grobstruktur-Radiografie

Die *Röntgenstrahlung*, eine elektromagnetische Welle sehr kurzer Wellenlänge (0,1 bis 0,004 nm), entsteht auf der Anode der Röntgenröhre infolge der aufprallenden, hoch beschleunigten Elektronen. Je höher die Anodenspannung ist, um so kurzwelliger und durchdringender ist die Strahlung. Bei Anodenspannungen von 120 oder 400 kV kann Eisen bis zu 26 mm bzw. 100 mm Dicke in ökonomisch tragbaren Zeiten untersucht werden. Der Brennfleck der Röhre (Entstehungsort dieser Strahlung) soll möglichst einen Durchmesser < 1 mm haben, damit scharfe Bilder erzeugt werden können und sich kleinere Aufnahmeabstände ergeben, die schließlich kürzere Belichtungszeiten für Aufnahmen gestatten.

Tab. 13.3.2-2 *Die wichtigsten Gammastrahlenquellen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*

radioaktives Isotop	ausgesandte Gammastrahlung Energie des Lichtquants in MeV	Halbwertszeit	durchstrahlbare Stahldicken in mm
Kobalt 60	1,33; 1,17	5,2 Jahre	50...170
Zäsium 137	0,66....	29 Jahre	30...100
Iridium 192	0,31....	74 Tage	8... 60
Thulium 170	0,084	127 Tage	bis 4 (Al: 5...40)
zum Vergleich Röntgenstrahlung:			
120 kV	0,120		bis 26
200 kV	0,200		bis 85
Betatron	15		bis 400

Künstlich erzeugte *radioaktive Isotope* zerfallen unter Abstrahlung von Gammaquanten. Man kennt eine Reihe radioaktiver Isotope, die für die Werkstoffprüfung geeignet sind, z. B. Co 60, das bei seinem Zerfall zunächst ein Elektron emittiert, dann aber als Ni 60 die dem Kobalt zugeschriebene Strahlung aus 1,33- bzw. 1,17-MeV-Gammaquanten liefert, die eine sehr hohe Durchdringungsfähigkeit aufweist. Die Strahlungsintensität bezeichnet man als *Aktivität*. Die Aktivität klingt nach einer Exponentialfunktion ab. Zu Prüfzwecken benötigt man Isotope, die lange *Halbwertszeiten* besitzen und daher lange Zeit genutzt werden können (Tab. 13.3.2-2).

Da radioaktive Isotope kontinuierlich strahlen, verwendet man zum Schutz sog. Aufbewahrungs- und *Arbeitsbehälter*. Die nutzbare Strahlungsintensität ist gegenüber der von Röntgengeräten wesentlich geringer, was längere Prüfzeiten erfordert.

Bei größeren Wanddicken wendet man das *Betatron* an (vgl. Tab. 13.3.2-2). Es handelt sich hier um einen Transformator, dessen Sekundärwicklung einen Elektronenstrahl darstellt, der in einer evakuierten Ringröhre durch magnetische Induktion hoch beschleunigt wird und – im geeigneten Moment herausgeführt – auf eine Anode prallt. Dort entsteht dann die Strahlung von einer Durchdringungsfähigkeit, die einer Beschleunigungsspannung von 15 bis 31 MeV entspricht.

Die Qualität einer radiografischen Aufnahme wird durch die *Schärfe* und den *Kontrast* der Zeichnung gekennzeichnet, die man unter dem Begriff der *Bildgüte* zusammenfaßt und durch einen auf das Prüfteil während der Untersuchung aufgelegten *Drahttest* kontrolliert. Aus einem jeder Anlage und jedem Filmmaterial zugeordneten Belichtungsdiagramm liest man bei dem Abszissenwert (der von außen feststellbaren Wanddicke) d die Anodenspannung U_a, den Abstand (= 50 cm) zwischen Film und Brennfleck der Röntgenröhre oder dem Präparat und die Belichtungsgröße ab. Sie ist das Produkt aus Röhrenstrom (mA) und Belichtungszeit (min) für Röntgenanlagen. Anstelle des Röhrenstroms wird für Radioisotope die Aktivität angegeben.

Die Anwendung der Radiografie hat sich bisher besonders bei der Prüfung auf innere Defekte von Werkstücken und -stoffen, d. h. auf *Risse*, *Lunker*, *Poren*, *Seigerungen*, Bindefehlern an *Schweißstellen* u. ä., bewährt. Bei hochwertigen Teilen kann man die Justierung kritischer Elemente, wie z. B. bei Hochvakuum-Elektronenröhren, kontrollieren. Unter Berücksichtigung der Strahlenschwächung kann man grundsätzlich alle Werkstoffe radiografisch untersuchen.

Da Röntgen- und Gammastrahlen die Menschen schädigen können, müssen die im Strahlenschutzgesetz festgelegten Maßnahmen, z. B. Dosimeterkontrolle und Genehmigungspflichten, unbedingt eingehalten werden.

Ultraschallverfahren. Als *Ultraschall* bezeichnet man elastomechanische Wellen im Frequenzbereich oberhalb 20 kHz, der Hörbarkeitsgrenze des menschlichen Ohres. Zur Prüfung von Werkstoffen verwendet man 1 bis 50 MHz, woraus sich Wellenlängen < 5 mm ergeben. Die Bündelung des Schallfelds gestattet eine gute Ortung der nachzuweisenden Fehler.

Von größter Bedeutung ist die Reflexion des Schalls an Materialgrenzen und dünnsten Einschlüssen, die noch in einer Dicke von 10 nm in Schallausbreitungsrichtung nachzuweisen sind. Erzeugung und Nachweis von Ultraschallwellen geschehen bei den Prüfverfahren vorwiegend durch Quarz- oder keramische Bariumtitanatscheiben mittels des piezoelektrischen Effekts bzw. seiner Umkehrung. Ihre Oberflächen werden mit Elektroden belegt und an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen. Unter Ausnutzung des Resonanzeffekts kann man z. B. mit einem 2 mm dicken Quarzplättchen Frequenzen von 1,4 MHz optimal abstrahlen oder empfangen.

Man kennt vor allem 3 Prüfmethoden. Beim *Durchschallungsverfahren* werden je ein Sender- und Empfängerwandler gegenüberliegend am Prüfstück angeordnet. Die Kopplung wird nur durch Fehler im Prüfteil beeinträchtigt, sofern die Schallwandlerankopplung an die Prüfteiloberfläche einwandfrei ist.

Das *Resonanzverfahren* sortiert die mit der Materialdicke über die Laufzeit im einfachen Zusammenhang stehenden Wellenlängen der als „Wellenlängengemisch" eingestrahlten Ultraschallenergie als *stehende Welle* heraus. Es wird

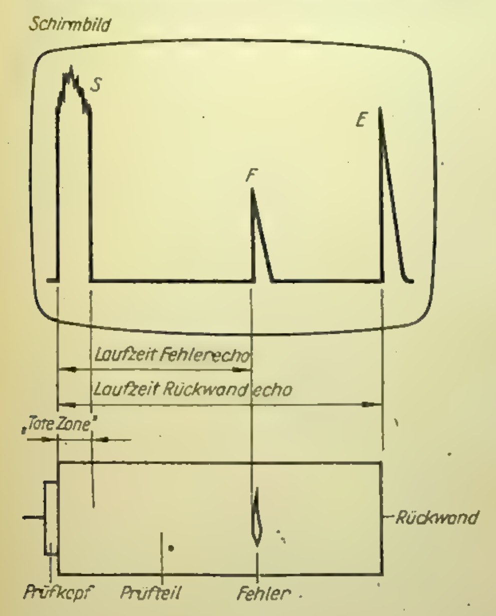


Abb. 13.3.2-3 Schirmbildanzeige beim Impuls-Echo-Verfahren

fast ausschließlich für Wanddickenkontrollen eingesetzt.

Das *Impuls-Echo-Verfahren* kommt in der Technik am häufigsten zur Anwendung. Die ≈ 2 µs „langen" eingesendeten Ultraschallimpulse kehren nach einer durch die Länge der Laufstrecke und durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmten Zeit zum Ausgangsort zurück. Der synchron auf dem Bildschirm ablaufende Vorgang stellt über die Zeit als Abszisse die

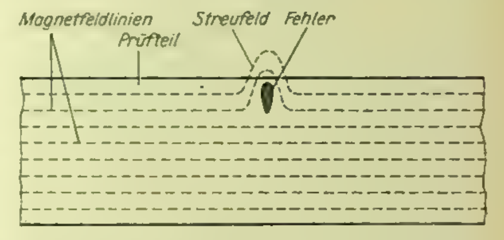


Abb. 13.3.2-4 Feldlinienverlauf beim magnetischen Prüfverfahren

Intensität als Ordinate dar. So findet man in Abb. 13.3.2-3 links den Sendeimpuls *S*, am rechten Rand das Echo *E* von der Rückwand. Die an der Fläche des zwischen beiden liegenden Fehlers reflektierten Wellen kehren nach entsprechend kürzerer Zeit als *E* zurück und verlassen die Anzeige *F*. Aus den Laufzeiten und der als Körperdicke bekannten Länge der Laufstrecke zwischen Vorder- und Rückwand kann man exakt die Tiefenlage des Fehlers errechnen. In Prüfobjekten bis zu 15 m Länge lassen sich feinste Trennungen nachweisen. Allerdings muß der Abstand des Fehlers von der Oberfläche beachtet werden. Ist dieser so gering, daß der von ihm reflektierte Impuls als Echo bereits eintrifft, wenn der Sendeimpuls noch nicht abgestrahlt wurde, ist der Fehlernachweis nicht möglich, da der Impuls vom Sendevorgang unterdrückt wird. Diese sog. *tote Zone* liegt je nach Frequenz, Gerät und Material zwischen 3 und 30 mm.

Magnetische Verfahren. Magnetisiert man ein ferromagnetisches Teil von konstantem Querschnitt bis zur magnetischen Sättigung, dann tritt an der Stelle ein *magnetischer Streufluß* auf, wo der Querschnitt z. B. durch einen Riß oder einen anderen Fehler verkleinert wird (Abb. 13.3.2-4). Die Magnetisierung erfolgt entweder durch einen Elektromagneten oder durch Einführen des Prüfteils in eine von hohen Strömen durchflossene Spule. Auch wird der elektrische Strom zur Felderzeugung oft durch das Prüfteil direkt geleitet.

Der Nachweis des Streufelds geschieht durch Aufbringen von sog. *Magnetöl* (in Öl aufgeschlämmtes, z. T. gefärbtes Fe_3O_4-Pulver) oder mit Hilfe einer automatisch über die Ober-

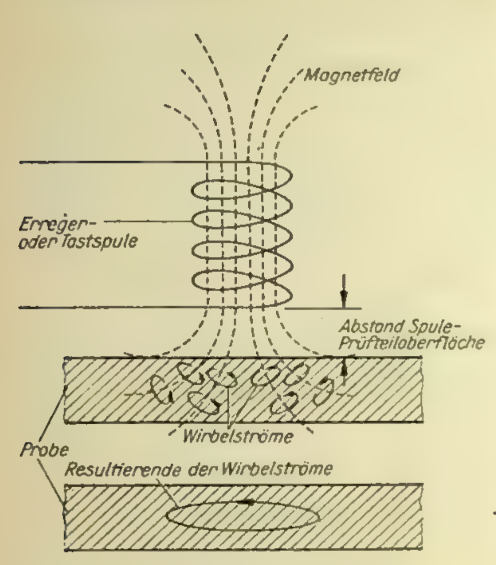


Abb. 13.3.2-5 Prinzip des Wirbelstromverfahrens

fläche geführten empfindlichen *Magnetfeldsonde*.
Mit diesem Verfahren kann man Riß- oder Fehlerverläufe unmittelbar bis 3 mm Tiefe verfolgen.
Magnetinduktive Verfahren. Das elektrisch leitfähige Prüfteil liegt im Magnetfeld einer von Wechselstrom durchflossenen *Erreger-* oder *Tastspule*. Dadurch entstehen im Prüfteil Wirbelströme, die ein dem primären entgegengerichtetes Magnetfeld aufbauen (Abb. 13.3.2-5). Durch Fehler im Prüfteil ändert sich die Resultierende der beiden Magnetfelder.
Zur Dickenmessung wird die Tastspule bündig aufgesetzt, und aus den Veränderungen ihres Scheinwiderstands kann auf die Dicke der Schicht oder Folie geschlossen werden. Der Dicke entsprechend ergibt sich ein materialspezifischer Kurvenzug (Abb. 13.3.2-6), der mit einem Oszillografen sichtbar gemacht werden kann. Die Steuerspannungen des Oszillografen lassen sich zur automatischen Sortierung bzw. Fehlersuche nutzen. Da das Erregerfeld mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche in das Material hinein abnimmt, ist die *Eindringtiefe* und damit die Anwendungsmöglichkeit begrenzt.
In entsprechender Weise kann man das Wirbelstromprinzip auf eine Prüfspulenanordnung übertragen, bei der das stangen- oder blechförmige Prüfteil durch eine Zylinder- oder Rechteckspule hindurchgleitet (*Durchlaufspule*) und so mit dem Magnetfeld in Wechselwirkung gelangt.

Diese magnetinduktiven Verfahren gestatten Dickenmessungen von Schichten, besonders aus elektrisch leitendem Material, auf Isolatoren, Isolierschichten auf Metallen oder Halbleitern u. ä. sowie Einzel- oder automatisierte Prüfungen auf Materialverwechslung, Reinheitsgrad, Härte (besonders von Aluminiumlegierungen), Zugfestigkeit, Seigerungen, Risse, Durchmesser bzw. Querschnittsfläche.
Thermoelektrisches Verfahren. In einem elektrischen Stromkreis aus Leitern unterschiedlicher Metalle I und II tritt eine elektromotorische Kraft (Thermo-EMK) auf, die der Temperaturdifferenz der beiden Verbindungsstellen 1 und 2 – bis auf einen materialspezifischen Parameter – proportional ist (*Seebeck-Effekt*). Trennt man einen der beiden Leiter auf, kann man die Thermo-EMK messen und zu unterschiedlichen Untersuchungen nutzen, wie z. B. Prüfung auf Verwechslung, Legierungsbestandteile, Gefügearten, Wärmebehandlungszustände, Schichtdicken u. a. Das Prinzip der thermoelektrischen Messung beruht auf dem Seebeck-Effekt (Abb. 13.3.2-7). Der Vorgang beginnt mit dem Aufsetzen des Tasters, der elektrisch beheizt ist, auf die Oberfläche des zu prüfenden Teils. Es wird dann die Anzeige von der Temperatur des Tasters und der Thermo-EMK zwischen den sich berührenden Materialien bestimmt, d. h. der Wolfram- oder Nikkelspitze und dem fraglichen Material.

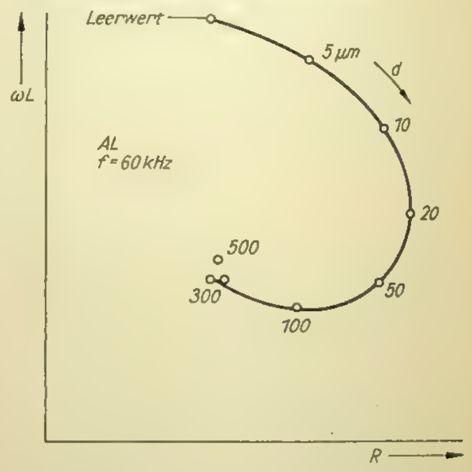


Abb. 13.3.2-6 Scheinwiderstandsebene zur Erklärung des Wirbelstrom-Prüfverfahrens

13.3.3. Sonderverfahren

Feinstruktur-Prüfverfahren mit Röntgen- und Elektronenstrahlung bauen auf der Wechselwirkung zwischen dem Kristallgitter der Werkstoffe und der Röntgenstrahlung auf, die monochromatisch ist, d. h. nur eine einzige Wellenlänge enthält. Für diese Wechselwirkung spielt das

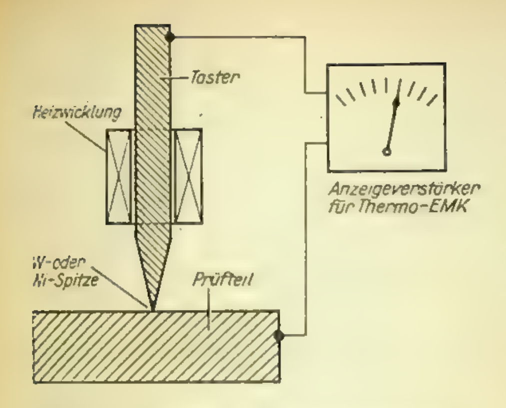


Abb. 13.3.2-7 Prinzip des thermoelektrischen Prufverfahrens

Braggsche Gesetz eine entscheidende Rolle: $2\,d \sin \vartheta = n \cdot \lambda$ (d = Netzebenenabstand, etwa Atomabstand, ϑ = Glanzwinkel, Winkel zwischen einfallendem Strahl und Kristallgitternetzebene, n = ganze Zahl, meist = 1, λ = Wellenlänge der Röntgenstrahlung).

Bei dem bekanntesten und wohl am häufigsten angewendeten *Debye-Scherrer-Verfahren* wird die meist drahtfömige polykristalline Probe als Achse des Fotofilmzylinders benutzt. Die von der Probe ausgehenden Beugungsstrahlen hinterlassen auf dem Film mehr oder weniger gekrümmte Linien, deren Lage ausgemessen wird und dann u. a. die *Gitterkonstante* des Materials, *Textur* – Vorzugslage einer Kristallorientierung und daher ungleichmäßige Eigenschaften in unterschiedlichen Richtungen –, *innere Spannungen* im Material, *Gitterstrukturtyp* zu bestimmen ermöglichen. Vielfach wird der Film durch ein Zählrohr ersetzt, wodurch man über entsprechende elektronische Geräte auf einem Schreiberstreifen die Röntgenintensität über dem Winkel erhält.

Technologische Prüfungen. Bei dieser Verfahrensgruppe erhält man meist nur eine Prüfaussage „Ja" oder „Nein" in bezug auf die zu vergleichenden Eigenschaften eines Prüf- und eines Normalteils. So vielfältig wie die Technik sind auch die Prüfverfahren, z. B. Biege-, Falt-, Abkant-, Hinundherbiegeversuch, Prüfung der Tiefziehfähigkeit, Näpfchen-, Keilzugprobe, Bördel-, Rohraufweitversuch, Sonderprüfungen an Ketten, Nieten, Muttern, Federn u. a. Jeder Versuch hat nur seinen begrenzten, oft betriebsspezifischen Gültigkeitsbereich.

14. Automatisierungstechnik

Die Vorstufe der Automatisierung ist die *Mechanisierung*. Charakteristisch für sie ist die Verwendung einer technischen Hilfsenergie, wobei jedoch die Führung des Arbeitsablaufs beim Menschen verbleibt und die Speicherung des Prozeßablaufs außerhalb des technischen Mittels, der Maschine, erfolgt. Wenn alle Tätigkeiten einer Einrichtung ohne Einwirkung des Menschen völlig selbsttätig ablaufen, ist der Prozeß automatisiert. Die gesamte Einrichtung, die die Vorgänge bewerkstelligt, wird *Automat* genannt. Unter *Automatisierung* versteht man den gesellschaftlichen Prozeß, bei dem fortlaufend immer mehr Automaten zum Ersatz menschlicher Tätigkeiten eingesetzt werden. Verallgemeinert kann gesagt werden, daß die Automatisierung durch die Verwendung von ausschließlich technischen Energiequellen, einer selbsttätigen Führung des Prozesses und der Speicherung des Prozeßablaufs durch ein im Automaten selbst enthaltenes Programm charakterisiert ist.

14.1. Zentrale Bedeutung der Automatisierungstechnik

Ein wesentliches Mittel zur ständigen Steigerung der Arbeitsproduktivität ist die Automatisierungstechnik. Die produktivitätssteigernde Wirkung ergibt sich aus dem erhöhten Tempo des Produktionsablaufs, der Qualitätsverbesserung, Energie- und Rohstoffeinsparung, Lebensdauererhöhung der Produktionsanlagen durch bessere Einhaltung der Prozeßparameter u. a. Daneben wirkt die Automatisierung direkt verbessernd auf die Arbeits- und Lebensbedingungen der Werktätigen, indem sie von gefährlichen, körperlich schweren und geistig monotonen Arbeiten befreit werden. Beim gegenwärtigen Stand der Produktionsmittel sind vollständig automatisierte Anlagen in der Industrie noch die Ausnahme. Es überwiegt die Teilautomatisierung, wobei jedoch der Automatisierungsgrad laufend ansteigt.

14.1.1. MSR-Technik

Die technischen Mittel zur Durchführung von Automatisierungsvorhaben sind im wesentlichen einerseits die MSR-Technik (Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, vgl. 13., 14.2.) und andererseits Rechentechnik und Datenverarbeitung (vgl. 14.3.). Der früher übliche Begriff *BMSR-Technik* (Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik) klammerte die Labormeßtechnik aus. Da aber heute zunehmend Betriebsmeß- und Labormeßtechnik auf der gleichen technologischen Basis aufbauen und eine Trennung beider daher nicht mehr sinnvoll erscheint, setzt sich folgerichtig der umfassendere Begriff MSR-Technik durch.

Um zu Kenntnissen über die reale Welt zu gelangen, betrachtet man zweckmäßigerweise kleinere, leichter überschaubare Gebiete. Man denkt sich also aus der realen Welt einzelne, in sich abgeschlossene Gebiete herausgeschnitten (Modellvorstellung der realen Welt). Solche Gebiete, *Systeme* genannt, bestehen aus einer Menge von miteinander verkoppelter *Glieder*, die jedoch als ein zusammenhangendes Ganzes betrachtet werden. Die beim „Herausschneiden" aufgetrennten Verbindungen dürfen nicht vernachlässigt werden, sie stellen die Angriffspunkte für Einwirkungen der Umwelt auf das System und Auswirkungen des Systems auf die Umwelt dar. Die Glieder werden bei der angestellten Betrachtung als nicht weiter zerlegbar angesehen. Das einfachste System enthält nur ein Glied, z. B. einen elektrischen Widerstand. Der andere Extremfall ist das System, das die gesamte reale Wirklichkeit enthält. Die Wissenschaft, die sich mit Theorie und Praxis der Systeme auf den verschiedensten Gebieten (Technik, Biologie, Medizin, Ökonomie) beschäftigt, ist die *Kybernetik*. *Technische Kybernetik* ist Automatisierungstechnik, d. h. die MSR-Technik in Verbindung mit Rechentechnik und Datenverarbeitung.

Unter der *Struktur* eines Systems versteht man die Beschreibung der Einwirkungen der einzelnen Glieder aufeinander. Die Struktur des Systems Fernsehgerät kann z. B. durch sein Schaltbild dargestellt werden. Die Glieder des

Systems sind die Bauelemente, wie Widerstände, Kondensatoren, Dioden, Transistoren usw. Die Einwirkungen der Glieder aufeinander sind stets an Stoff- oder Energieaustausch gebunden. Dies ist ein durch die Erfahrung bedingtes Postulat. Man wird stets unterscheiden können, ob der Stoff- oder Energieaustausch selbst erstrangig ist oder die damit verbundene *Information*. Beim System Fernsehgerät ist z. B. der elektrische Strom aus dem Netztransformator selbst erstrangig; er dient zur Energieversorgung aller übrigen Glieder des Systems. Anders verhält es sich mit dem Strom, der durch den Helligkeitsregler festgelegt wird; er dient zur Weiterleitung der Information, wie hell der Betrachter das Fernsehbild zu sehen wünscht. Energetische Träger, die zur Informationsdarstellung dienen, werden *Signale* genannt (vgl. 11.4.1.).

Das *Signalflußbild* ist die am häufigsten verwendete Art zur schematischen Darstellung der Struktur eines Systems (Abb. 14.1.1-1). Es enthält nur *Übertragungsglieder* und ihre gegenseitige Verkopplung. Übertragungsglieder sind rückwirkungsfreie Glieder, d. h. bei ihnen beeinflussen die Ausgangssignale x_{ai} nicht die Eingangssignale x_{ei} und die Ausgangssignale werden nicht durch die Eingänge angekoppelter Glieder verändert.



Abb. 14.1.1-1 Signalflußplan eines Übertragungsgliedes (x_e = Eingangsgrößen, x_a = Ausgangsgrößen)

Im Rechteck des Signalflußbildes wird das Übertragungsglied charakterisiert, d. h. die Beziehungen zwischen x_{ai} und x_{ei} angedeutet. Dies geschieht entweder durch Angabe eines allgemeinen Namens (Helligkeitsregler, Rohrleitung usw.), durch Angabe einer statischen Kennlinie (z. B. bei nichtlinearen Gliedern) oder durch Angabe der mathematischen Beschreibung in Form der Differentialgleichung, Übergangsfunktion oder des Frequenzgangs usw. (vgl. 14.2.1.).

14.1.2. Prozesse

Unter einem Prozeß versteht man die Umformung oder den Transport von Stoffen, Energien oder Informationen. Prozesse lassen sich einteilen in *determinierte*, wobei nur Größen auftreten, deren Abhängigkeit von der Zeit genau beschreibbar ist, und *stochastische*, bei denen der Wert der auftretenden Größen zufällig ist. Für die Automatisierungstechnik wesentlich ist die Einteilung der Prozesse nach Kontinuität der gewünschten Ausgangsgröße in *kontinuierliche* (Mengen- oder Fließprozesse) und *diskontinuierliche* (Stückgutprozesse). Beispiele für erstere sind die Erzeugung elektrischer Energie durch wasserkraftbetriebene Generatoren oder die Bereitstellung von Trinkwasser aus Tiefbrunnen durch Pumpen, Beispiele für letztere die Anfertigung von Schrauben auf einem Drehautomaten oder die Herstellung von Fernsehgeräten auf einem Fließband. Eine dritte Prozeßart ist der *hybride Prozeß* (*Chargenprozeß*), im Großen betrachtet ein diskontinuierlicher Prozeß, in dem kontinuierliche Prozesse eingebettet sind. So ist z. B. der Glühprozeß von Stahlblöcken in einem Walzwerk durch Einsatz der kalten Blöcke und Abtransport der aufgeheizten Blöcke ein diskontinuierlicher Prozeß. Der Aufheizvorgang selbst, bei dem die Temperatur in einer gasbeheizten Glühkammer nach einem vorgegebenen Zeitverlauf eingehalten werden muß, ist ein kontinuierlicher Prozeß. Sehr viele Prozesse in der chemischen Industrie, die in chemischen Reaktoren verlaufen, sind Chargenprozesse (vgl. Hauptkapitel 4.).

14.2. Steuerungs- und Regelungstechnik

14.2.1. Übertragungsglieder

Einteilung. Glieder können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden, z. B.:

– nach der Art des zulässigen Signals als analoges, diskretes, Mehrpunkt-, digitales, hybrides Glied;

– nach der Art des Parameters des Signals, der die Information trägt, z. B. Amplitude, Frequenz, Phase, Pulsbreite;

– nach der zeitabhängigen Steuerbarkeit der Ausgangsgröße als kontinuierliches Glied, wenn die Ausgangsgröße ein kontinuierliches Signal ist, oder ein diskontinuierliches Glied, bei dem die Ausgangsgröße ein diskontinuierliches Signal ist;

– nach der Art des Übertragungsverhaltens als lineares oder nichtlineares Glied (Abb. 14.2.1-1);

– nach der zeitlichen Konstanz der Struktur und Parameter als zeitinvariantes oder zeitvariantes Glied;

– nach der Art der Hilfsenergie als passives (ohne Hilfsenergie) oder aktives Glied (elektrisches, elektromechanisches, pneumatisches, hydraulisches Glied);

– nach der Aufgabe als Meß-, Anzeige-, Speicher-, Rechenglied, Regler usw.;

– nach der Zeitabhängigkeit der Ausgangssignale bei konstanten Eingangssignalen als statisches (zeitunabhängig) oder dynamisches Glied (zeitabhängig).

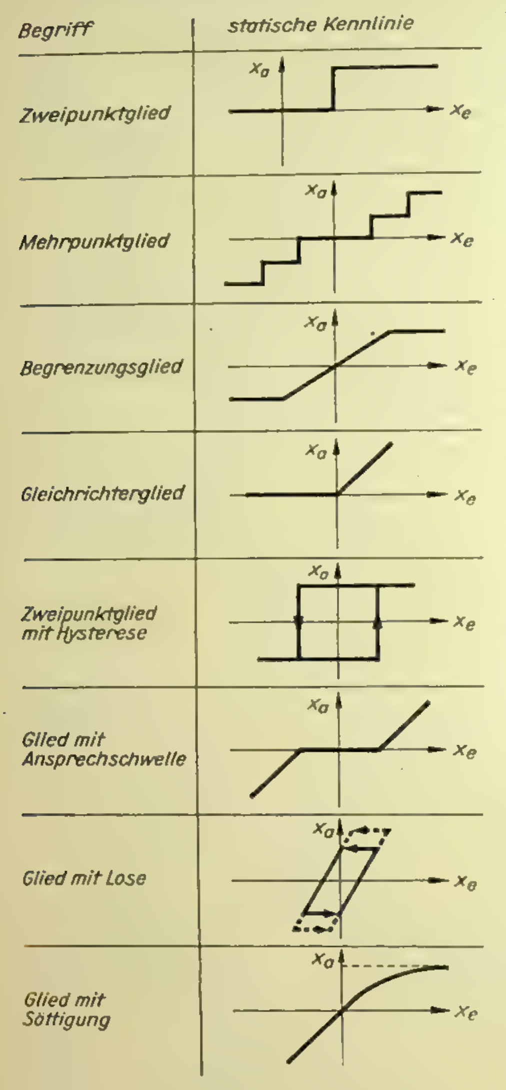


Abb. 14.2.1-1 *Nichtlineare Glieder*

14.2.2. Steuern und Regeln

Steuern ist das zielgerichtete Beeinflussen von Größen in Systemen. Das Prinzip eines Steuerungssystems, hier in einer Reihenstruktur, zeigt Abb. 14.2.2-1.

Der *Operateur* ist der Mensch, der die Arbeitsweise des Systems überwacht. Die *Steuereinrichtung* ist ein System von Gliedern, das die gewünschte Beeinflussung ermöglicht, und die *Steuerstrecke* der Teil des Wirkungsweges, in dem sich die aufgabengemäß zu beeinflussenden Glieder mit den zu steuernden Größen befinden. Größen, die die zu steuernde Größe in ungewollter Weise beeinflussen, heißen *Störgrößen*. *Beispiel*: Die Beheizung eines Bürogebäudes soll während der täglichen Arbeitszeit gesichert werden. Dazu gibt eine Schaltuhr, das *Steuerglied*, vor Arbeitsbeginn ein Steuersignal ab, durch das ein Motor, der *Stellantrieb*, eingeschaltet wird, der ein Ventil, das *Stellglied*, öffnet und somit den Dampf einströmen läßt. Motor und Ventil stellen die *Stelleinrichtung* dar. Die *Steuerstrecke* sind die Arbeitsräume einschließlich der Heizkörper, Leitungen usw. Die wesentlichste Störgröße ist hierbei die Außentemperatur.

Regeln. Die in Abb. 14.2.2-1 gezeigte Steuerung ist nur eine sehr einfache Form. Die Struktur einer Steuerung kann die verschiedensten Reihen-, Parallel- und Kreisstrukturen aufweisen. Von herausragender Bedeutung unter diesen Möglichkeiten ist die Steuerung mit einer Rückführung (Kreisstruktur), die so ausgeführt ist, daß die Werte der gesteuerten Größe fortlaufend mit den Werten einer Führungsgröße verglichen

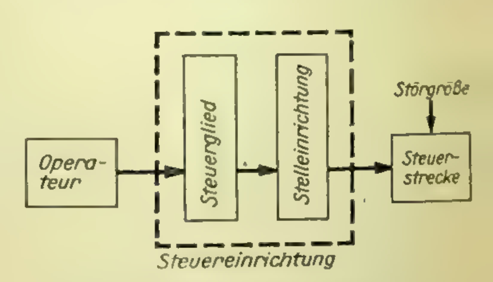


Abb. 14.2.2-1 *Prinzip eines Steuerungssystems*

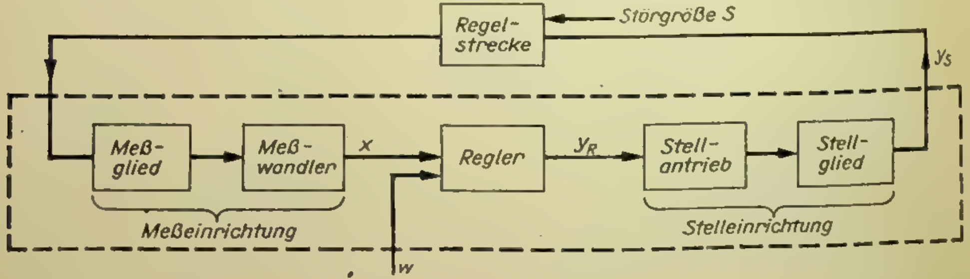


Abb. 14.2.2-2 *Prinzip eines Regelkreises*

werden, um trotz einwirkender Störgrößen den Wert der gesteuerten Größe dem der Führungsgröße durch Stellen anzugleichen. Die *Führungsgröße* ist also die Größe, an deren Wert der Wert der gesteuerten Größe angeglichen werden soll. Abb. 14.2.2-2 zeigt ein solches Steuerungssystem mit Kreisstruktur, einen *Regelkreis*. Diese Art der Steuerung nennt man *Regelung*. Mit Hilfe der Meßeinrichtung wird der zu regelnde Parameter, die *Regelgröße* x, der Regelstrecke erfaßt und dem Regler zugeführt. Der *Regler* vergleicht fortlaufend den Wert der Regelgröße mit dem Wert der Führungsgröße, wobei er die *Regelabweichung* $x_w = x - w$ bildet. In Abhängigkeit von x_w erzeugt er seine Ausgangsgröße, die *Stellgröße* y_R. Diese wird auf die Stelleinrichtung gegeben und in die Streckenstellgröße y_S (z. B. die Stellung eines Ventils) umgeformt. Die neue Stellung bewirkt eine solche Änderung von x, daß x_w allmählich zu Null wird. Die Meßeinrichtung kann in das *Meßglied* (beim Messen von Temperaturen z. B. ein Widerstandsthermometer) und in den *Meßwandler*, der das Ausgangssignal des Meßglieds in ein für den Regler geeignetes Signal umwandelt, eingeteilt werden. *Beispiel*: Bei einer Temperaturregelung wird die Temperatur mit einem Widerstandsthermometer gemessen und auf einem Widerstandswert abgebildet. Ein Meßwandler ordnet jedem Widerstandswert des Meßglieds eine bestimmte Spannung, die Regelgröße x, zu. Die gewünschte Raumtemperatur entspricht dann einem eingestellten Spannungswert, der Führungsgröße. Die Ausgangsspannung des Meßwandlers und die Führungsgröße werden vom Regler verglichen. Tritt eine Regelabweichung x_w auf, so wird sie als veränderte Reglerausgangsgröße y_R erscheinen und auf den Stellantrieb einwirken. Dieser korrigiert die Stellung des Ventils (Stellglied) so lange, bis die Regelabweichung = 0 ist. Beim Auftreten von Störgrößen (Außen- oder Dampftemperaturänderung, Fenster öffnen u. a.) wiederholt sich der Regelvorgang.

Regelfaktor, Stabilität, Regelgüte. Wenn die Steuerungsvorgänge ohne Mithilfe des Menschen erfolgen, so spricht man von automatischer Steuerung (vgl. 14.2.5.) bzw. automatischer oder selbsttätiger Regelung. Prinzipiell kann der Vergleich zwischen x und w, die Verarbeitung dieser Information und das entsprechende Betätigen des Stellglieds auch durch den Menschen erfolgen. Man spricht dann von Handsteuerung bzw. -regelung. Es gibt jedoch eine Reihe von Fällen, wo der automatische Betrieb eine Notwendigkeit ist, z. B. dort, wo die menschlichen Reaktionszeiten zu lang sind (Drehzahlregelung von Turbinen, Kernreaktoren). Um den Vorteil einer Regelung gegenüber einer normalen Steuerung quantitativ auszudrükken, bildet man das Verhältnis

x_w (mit Regler)/x_w (ohne Regler) = *Regelfaktor*.

Stabilität ist das Kernproblem jeder Regelung.

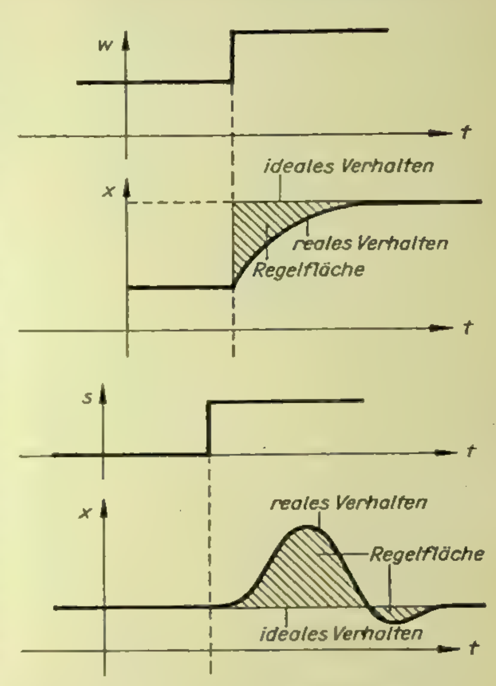


Abb. 14.2.2-3 oben Führungsübergangsfunktion, unten Störübergangsfunktion

Wenn z. B. bei der beschriebenen Temperaturregelung durch den Einfluß von Störgrößen die Temperatur absinkt, erfolgt eine Stellgliedkorrektur, damit der Sollwert wieder erreicht wird. Dadurch kann jedoch der Sollwert überschritten werden, und es erfolgt eine Stellgliedkorrektur in anderer Richtung. Die Temperatur sinkt unter den Sollwert, das Stellglied spricht an usw. Es erfolgt ein „Aufschaukeln", d. h. die Schwankungen um den Sollwert wachsen an, die Regelung ist instabil. Das muß durch optimale Reglerparameter oder strukturverändernde Maßnahmen verhindert werden.

Regelgüte. Die Arbeitsweise einer Regelung kann dadurch veranschaulicht werden, daß man sprungförmig die Führungsgröße ändert bzw. künstlich eine Störgröße S sprunghaft aufschaltet. Von der Regelung wird gefordert, daß die Regelgröße im ersten Fall möglichst unverzüglich der Führungsgröße folgt, im letzteren sich möglichst wenig von ihrem Sollwert entfernt. So ein ideales Verhalten wird durch die Verzögerungs- und Laufzeitglieder der Regelstrecke nicht erreicht. Die entsprechenden Zeitverläufe heißen Führungs- bzw. Störübergangsfunktion (Abb. 14.2.2-3). Einen zahlenmäßigen Ausdruck für die Regelgüte liefern Gütekriterien. Im Hinblick auf eine wünschenswerte schnelle Beendigung des Übergangsvorgangs bewertet man

neben der Höhe der Regelabweichung auch deren Dauer.

Arten der Regelung. Regelungen können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden:

- nach der Art der Regelgröße (Temperatur-, Druck-, Spannungs-, Drehzahl-, Niveauregelung usw.);
- nach der Art der Signalverarbeitung (analog, digital, getastet usw.);
- nach Art der Eingabe der Führungsgröße (Festwert-, Folge-, Zeitplanregelung);
- nach der Struktur des Regelkreises.

Während bei der *Festwertregelung* die Führungsgröße konstant ist, ist sie bei der *Folgeregelung* veränderlich, und ihr zeitlicher Verlauf ist vorher nicht bekannt. Die *rechnergeführte Regelung* ist eine besondere Art der Folgeregelung, bei der die Führungsgröße durch einen übergeordneten Rechner vorgegeben wird. Bei der *Zeitplanregelung* ist die Führungsgröße ebenfalls veränderlich, jedoch ist ihr zeitlicher Verlauf vorher genau bekannt. Sie wird durch einen Zeitplangeber erzeugt, indem z. B. ein Uhrwerk eine Kurvenscheibe bewegt, die von einem Hebel abgetastet wird. Durch die Hebelbewegung wird der Abgriff eines Potentiometers bewegt und so ein vorgeschriebener zeitlicher Verlauf der Führungsgröße erzeugt (Abb. 14.2.2-4). Der zeitliche Verlauf der Temperatur bei Chargenprozessen in chemischen Reaktoren wird z. B. auf diese Weise realisiert.

Regelkreisstrukturen. Man unterscheidet einschleifige (vgl. Abb. 14.2.2-2) und mehrschleifige Strukturen. Beispiele für letztere sind nachfolgende Regelungen zur Verbesserung von Stabilität und Regelgüte bei schlecht regelbaren Regelstrecken (große Zeitkonstanten der Verzögerungsglieder der Strecke, große Laufzeiten).

Störgrößenaufschaltung. Hierbei werden als zusätzliche Eingangssignale meßbare Störungen bewußt in geeigneter Weise durch das Übertragungsglied H in das System eingeführt, um Auswirkungen der Störgrößen von vornherein zu verhindern.

Hilfsregelgrößenaufschaltung. Eine geeignete Hilfsregelgröße wird für die Bildung eines Hilfsregelkreises verwendet, um z. B. große Verzögerungen und Laufzeiten von Teilen der Strecke durch ein parallelgeschaltetes DT_1-Glied zu kompensieren.

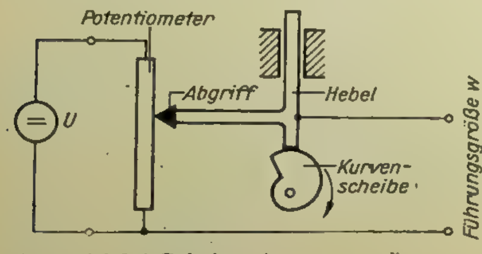


Abb. 14.2.2-4 Zeitplangeber

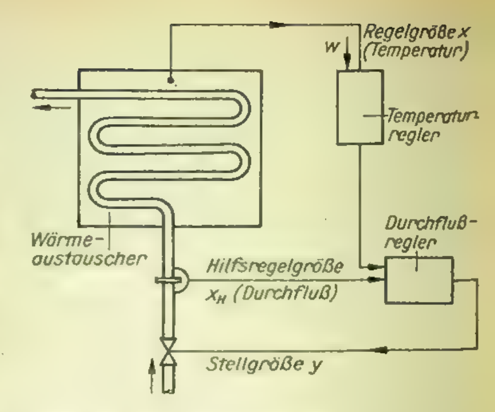


Abb. 14.2.2-5 Kaskadenregelung eines Wärmeaustauschers

Die *Kaskadenregelung* ist eine Hilfsregelgrößenaufschaltung, bei der der Hilfsregelkreis unter Verwendung eines Hilfsreglers gebildet wird. Ein praktisches Beispiel einer Kaskadenregelung ist die Temperaturregelung in einem Wärmeaustauscher (Abb. 14.2.2-5). Regelgröße ist die Temperatur des erwärmten Wassers, Stellgröße die Ventilstellung für die Dampfzufuhr zum Wärmeaustauscher. Als Hilfsregelgröße dient der Dampfdurchfluß. Der Hauptregler liefert die Führungsgröße für den Hilfsregler. Man erkennt daran die jeder Kaskadenregelung zugrunde liegende Idee, daß ein schneller Hilfsregelkreis einem trägen Hauptregelkreis unterlagert ist. In analoger Weise kann man statt einer Hilfsregelgröße eine geeignete Hilfsstellgröße verwenden und erhält damit die *Hilfsstellgrößenaufschaltung*.

14.2.3. Regler

Ein *Regler* ist die gerätetechnische Realisierung eines Übertragungsgliedes, das den Wert der Eingangsgröße fortlaufend mit dem Wert der Führungsgröße vergleicht und den Wert der Ausgangsgröße abhängig vom Ergebnis des Vergleichs steuert. Es gelten daher die Einteilungsprinzipien wie für Übertragungsglieder.

Analoge, lineare, kontinuierliche Regler. Die wichtigsten Regler dieser Gruppe sind Regler mit P-, I-, PI-, PD- und PID-Verhalten. Die prinzipielle Realisierung wird am Beispiel eines elektronischen PID-Reglers gezeigt (Abb. 14.2.3-1). Verwendet werden Verstärker in Form integrierter Schaltkreise. In einer Eingangsschaltung wird die Regelgröße x mit dem mit -1 multiplizierten Wert der Führungsgröße w verglichen. Wenn $x = w$, heben sich die

Wirkungen von x und $-w$ am Summierpunkt S auf und der nachfolgende Verstärker V_1 erhält kein Signal. Die Genauigkeit, mit der dieser Vergleich durchgeführt wird, ist entscheidend für die Qualität des Reglers. Es ist von untergeordneter Bedeutung, wie genau die Parameter K_p, T_N und T_V sind (10 bis 20% Fehler sind zulässig), sie beeinflussen nur den zeitlichen Verlauf des Regelvorgangs. Die Genauigkeit des x-w-Vergleichs bestimmt, wie genau sich die Regelgröße der Führungsgröße angleicht. An V_1 wird mit R_0 der proportionale Übertragungsfaktor $K_p = R_0/R$ eingestellt. Durch die nachfolgende Verzweigung in 3 parallele Kanäle werden die Anteile P, I und D realisiert. Mit V_2 wird das Integralglied hergestellt, der Parameter Nachstellzeit $T_N = R_1C_1$ kann mit R_1 eingestellt werden. Durch V_3 wird das D-Glied realisiert, der Parameter $T_V = R_2C_2$ wird mit R_2 eingestellt. Durch V_4 werden die 3 Anteile summiert und als Stellgröße y_R zur Verfügung gestellt. Für praktische Fälle wird das D-Glied noch mit einer Verzögerung versehen, um unnötige Stellgliedbewegungen durch technisch bedingte, kurzfristige Störungen zu vermeiden. Regler mit einem integralen Anteil bewirken, daß die Regelgröße der Führungsgröße genau angeglichen wird. Fehlt der integrale Anteil, so entsteht prinzipbedingt eine bleibende Regelabweichung, die um so kleiner ist, je höher (aus Stabilitätsgründen begrenzt) die Verstärkung im Regelkreis gemacht werden kann.

Diskrete, nichtlineare, kontinuierliche Regler. Typischer Vertreter dieser Gruppe ist der *Mehrpunktregler*. Hierbei sind Intervallen von x_w jeweils konstante Werte von y_R zugeordnet. Ein häufig verwendeter Mehrpunktregler ist der *Dreipunktregler*. Die Ansprechempfindlichkeit ist i. allg. einstellbar, um einen günstigen Kompromiß zwischen Regelgenauigkeit und Schalthäufigkeit schließen zu können. Versieht man den Dreipunktregler mit einer Rückführung, die das Ausgangssignal des Dreipunktgliedes auf die Eingangsschaltung zur Regelabweichungsbildung zurückführt (Abb. 14.2.3-2), so entstehen Regler, die in ihrem äußeren Verhalten den analogen, linearen, kontinuierlichen Reglern ähnlich sind. Vorteil dieser Regler ist ihr einfacher Aufbau und die Tatsache, daß keine analogen Stellantriebe erforderlich sind; Stellglieder werden nur ein- bzw. ausgeschaltet, Motore in ihrer Drehrichtung geändert bzw. ausgeschaltet.

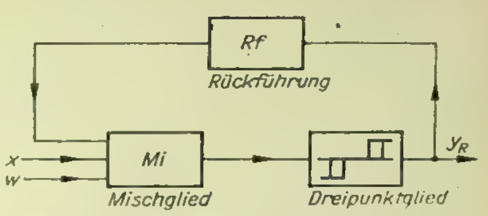


Abb. 14.2.3-2 Dreipunktregler mit Rückführung

Digitale Regler sind ein Sonderfall der diskreten Regler. In ihrer höchsten Form werden dabei programmierbare Digitalrechner (Prozeßrechner) eingesetzt, wobei die Einrichtung eine Information über die Regelabweichung verarbeitet und direkt das Stellsignal für die Stelleinrichtung liefert (direkte digitale Regelung, DDC). Ein Prozeßrechner wird dabei für mehrere Regelkreise gleichzeitig verwendet.

Diskontinuierliche Regler (Tastregler). Zur Regelung von Strecken mit großen Laufzeiten werden *Tastregler* eingesetzt. Hierbei wird vor einem Regler der bisher beschriebenen Art ein Tastglied angebracht. Es tastet zu bestimmten Zeitpunkten kurzzeitig das Eingangssignal ab und stellt es als Ausgangssignal zur Verfügung. Eine Stellgliedverstellung wirkt sich bei Strecken mit Laufzeit erst nach Ablauf dieser Zeit auf die Regelgröße aus. Es ist also sinnvoll, erst diese Zeit abzuwarten, um eine neue Stellgliedverstellung zu berechnen. Das wird erreicht, indem das Abtastintervall gleich der Laufzeit gewählt wird. Bei der DDC ist eine Abtastung erforderlich, um durch einen Digitalregler mehrere Regelkreise zu versorgen.

Weitere Einteilungsprinzipe. Außer den Einteilungsprinzipen wie für Übertragungsglieder gibt

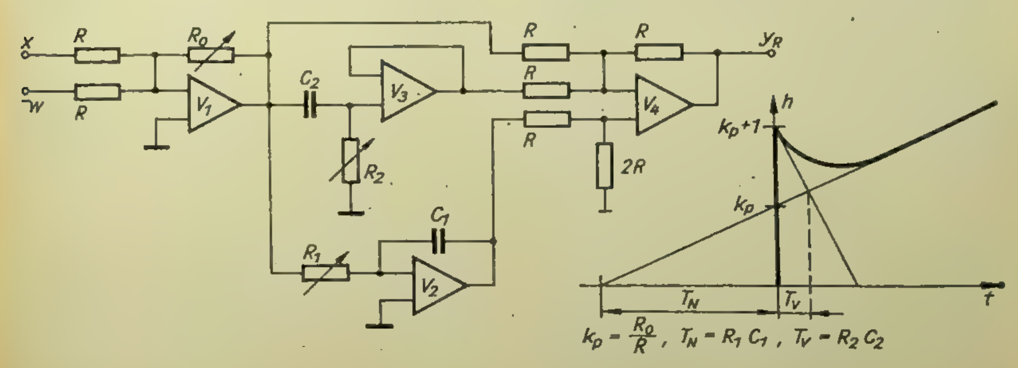


Abb. 14.2.3-1 Prinzip eines elektronischen PID-Reglers mit Übergangsfunktion

es für Regler noch die Einteilung:

– nach der Aufbereitung der Regelgröße in Regler für natürliche Signale (von Thermoelement, Widerstandsthermometer, pH-Elektroden usw. und Regler für Einheitssignale, wobei die Signale der Meßglieder durch Meßwandler auf ein vereinheitlichtes Signal, z. B. 0 bis 10 V, 4 bis 20 mA, 2 bis 10 N/cm², abgebildet werden;

– nach dem Anwendungsgebiet in Verfahrens- oder Prozeßregler (für Strecken mit relativ hohen Verzögerungszeiten, daher $T_N = 25$ bis 2000 s, $T_V = 0{,}3$ bis 300 s) und Antriebsregler (Reglerparameter im Millisekundenbereich);

– nach der Hilfsenergie in direkt wirkende Regler (Regler ohne Hilfsenergie, z. B. Bimetallregler im Bügeleisen, Kühlmitteltemperaturregler im Kraftfahrzeug, Niveauregler im Toilettenspülkasten, robust, wartungsarm, preiswert), elektrische Regler (für große Entfernungen, Verknüpfung vieler Signale, hohe Genauigkeit), pneumatische Regler (explosionssicher, einfacher Aufbau, geringer Preis) und hydraulische Regler (große Stellkräfte, hohe Stellgeschwindigkeit);

– nach der Bauweise in Kompaktregler (alle Funktionsteile, einschließlich der Sonderfunktionen, bilden eine gerätetechnische Einheit, Einsatz vor allem bei fehlender zentraler Warte, bei Einzweckreglern) und Bausteinregler (die Einzelfunktionen werden auf getrennten steckbaren Bausteinen untergebracht, die in vielfältigen Varianten zu Reglern konfektioniert werden können, wirtschaftliche Fertigung spezieller Reglerarten trotz geringer Stückzahl, Einsatz in Warten, großer Platzbedarf);

– nach dem Funktionsprinzip in Stabausdehnungsregler (temperaturabhängige Länge eines Stabes betätigt einen Kontakt, der eine Heizung ein- oder ausschaltet) und Meßwerkregler (sehr bedeutende Gruppe von Reglern, bei der die Regelgröße einen Zeiger bewegt, der einen Kontakt betätigt, sobald er einen festen, den Sollwert darstellenden Zeiger erreicht, Zweipunktverhalten, Ausführung auch als Mehrpunktregler durch mehrere feststehende Zeiger und als Tastregler, indem der Meßwerkzeiger über Uhrwerk und Nockenscheibe periodisch an die feststehenden Zeiger gedrückt wird);

– nach der Anwendungsbreite in Universalregler (für verschiedene Regelgrößen geeignet, meist als Regler für Einheitssignale) und Einzweckregler (für wenige oder nur eine Regelgröße geeignet, z. B. Drehzahl-, Temperatur-, Niveauregler, meist als Regler für natürliche Signale).

Sonderfunktionen. Der Regler muß, wenn er nicht ausschließlich für Folgeregelung eingesetzt werden soll, eine Quelle (z. B. eine hochgenaue Spannungsquelle) und ein Einstellelement (z. B. ein Potentiometer) für die Führungsgröße enthalten. Zur Komplettierung eines Reglers werden eingesetzt: Anzeige der Führungsgröße, der Regelgröße, der Regelabweichung, der Stellgröße, Umschalter Handeinstellung/Regelung, Quelle und Einstellelement für Handeinstellung, einstellbare Grenzen für die Stellgröße u. a.

14.2.4. Stelleinrichtungen

Nicht in jedem Fall ist die klare Einteilung der Stelleinrichtung in Stellantrieb und Stellglied möglich. In vielen Fällen kann die Ausgangsgröße des Reglers y_R unmittelbar als Streckenstellgröße y_S dienen. Das ist beispielsweise der Fall bei der Temperaturregelung eines kleinen Thermostaten, dessen Heizleistung direkt vom Verstärkerausgang des Reglers geliefert wird. In diesem Fall entfallen sowohl Stellantrieb als auch Stellglied. Bei der Lageregelung von Werkstükken, die bei der Automatisierung der mechanischen Fertigung eine große Rolle spielt (numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, vgl. 8.9.2.), entfallen die Stellglieder. Die Werkstücke werden direkt vom Stellantrieb bewegt. In allen Fällen, in denen die Streckenstellgröße ein Weg ist, werden Stellantrieb und Stellglied benötigt. In vielen Fällen reicht die Leistung des Reglerausgangs nicht zur Betätigung des Stellantriebs aus. Dann ist ein Leistungsverstärker erforderlich, der gewöhnlich mit zur Stelleinrichtung gerechnet wird. In Sonderfällen müssen auch noch Wandlungen der Energieform stattfinden, Gleichspannung von 0 bis 10 V in Netzwechselstrom oder Drehstrom bzw. Gleichstrom in pneumatische oder hydraulische Signale (Systemwandler).

Stellantriebe. Zur Betätigung der Stellglieder gibt es Stellantriebe für folgende mechanische Größen:

– lineare Bewegungen (Hübe) für Ventile und Schieber (10 bis 100 mm, Schubkräfte 0,1 bis 100 kN);

– Winkelbewegungen zur Betätigung von Drosselklappen, aber auch über Hebelgetriebe für Ventile und Schieber (90 bis 270°, Drehmomente 10 bis 10^4 Nm);

– Drehbewegungen zur Betätigung von Absperrschiebern (bis zu einigen 10 Umdrehungen).

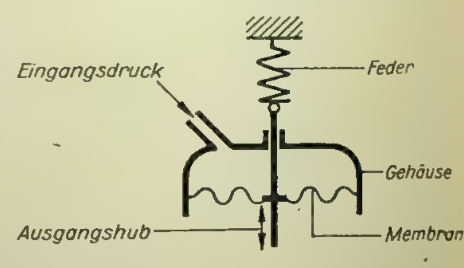


Abb. 14.2.4-1 Prinzip eines pneumatischen Antriebs

Wesentlicher Teil des Stellantriebs ist der *Stellmotor*. Daneben können noch Endlagenschalter, Handverstellung, Stellungsmelder und Einrichtungen zum Einnehmen eines gefahrlosen Zustands bei Havarie vorhanden sein. Als Stellmotor werden Magnete (Magnetventil, Zweipunktglied), Gleichstromscheibenankermotore, drehzahlsteuerbare Zweiphasen-Asynchronmotore, Dreiphasen-Asynchronmotore verwendet sowie pneumatische (Abb. 14.2.4-1) und hydraulische Antriebe eingesetzt. Zur Erzeugung der erforderlichen Kräfte und Drehmomente sind bei elektrischen Stellantrieben Getriebe erforderlich.

Stellglieder. Man unterscheidet zwischen Stellgliedern für Stoffströme bzw. von Stoffströmen getragene Energieströme (z. B. Dampf) und Stellgliedern für masselose Energieströme. Im ersten Fall handelt es sich um Ventile, Drosselklappen und Schieber.

Ventile sind Drosselglieder für Stoffströme, bei dem durch Bewegen (Hub) eines Drosselkörpers ein wirksamer Strömungsquerschnitt verändert wird. Dabei wird die Strömung in einem Gehäuse so umgelenkt, daß sie im Bereich des Drosselquerschnitts annähernd parallel (beim Schieber senkrecht) zur Bewegungsrichtung des Drosselkörpers verläuft (Abb. 14.2.4-2).

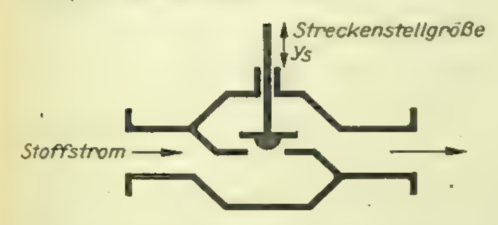


Abb. 14.2.4-2 Prinzipdarstellung eines Ventils

Drosselklappen sind meist kreisrunde Scheiben, die drehbar in eine Rohrleitung eingebaut und bei geringen Drücken angewendet werden (z. B. im Schornsteinabzug zur Feuerraumunterdruckregelung).

Im zweiten Fall handelt es sich um Stelltransformatoren, Stellwiderstände und elektrische Schaltelemente. Stelltransformatoren und -widerstände werden durch Stellantriebe, ähnlich wie die bereits beschriebenen Stellglieder, betätigt. Die Anordnung entspricht also der zur Beeinflussung von Stoffströmen. Sie ist einfach, preiswert, jedoch nur für langsame Regelungen geeignet. Elektrische Schaltelemente sind vor allem Thyristorleistungsverstärker, Thyristoren, Triacs mit entsprechenden Ansteuerschaltungen und magnetische Verstärker. Hier liegt der Sonderfall vor, daß die Stelleinrichtung nur aus dem Stellglied besteht. Haupteinsatzgebiete sind die Antriebs- und die Temperaturregelung mit elektrisch beheizten Strecken. Die Relais und Schaltschütze gehören bedingt auch in diese Gruppe, wobei hier ein weiterer Sonderfall auftritt: es ist ein Stellantrieb (elektromechanisch durch Magnet) vorhanden, der jedoch konstruktiv mit dem Stellglied (Kontaktstück als elektrisches Schaltelement) verbunden ist.

14.2.5. Arten von Steuerungen

Je nach Art der verwendeten Hilfsenergie wird zwischen elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Steuerungen unterschieden. Elektrische Steuerungen dominieren, da sie sich durch kurze Operationszeiten und eine hohe Funktionsdichte, insbesondere bei Verwendung integrierter Schaltungen (vgl. 11.5.4.), auszeichnen. Pneumatische Steuerungen werden bevorzugt in explosionsgefährdeten Anlagen der chemischen Industrie eingesetzt. Hydraulische Steuerungen sind dort im Vorteil, wo große Stellkräfte auf kleinem Raum aufgebracht werden müssen. Mit Hilfe elektropneumatischer bzw. -hydraulischer Wandler können auch Steuerungen mit 2 Arten von Hilfsenergien realisiert werden.

Handsteuerung. Hierbei wirkt der Eingriff des Menschen direkt auf das zu steuernde Objekt, z. B. beim Einschalten eines Motors über einen Tastschalter und ein Schaltschütz. Der Mensch ist hierbei untrennbarer Bestandteil des Wirkungsweges, wie etwa bei der „Bedienung" einer Bohrmaschine oder einer nichtautomatisierten Drehmaschine. Er steuert und überwacht alle Vorgänge, und von seiner Geschicklichkeit hängt das Arbeitsergebnis ab.

Automatische Steuerung. Sobald eine Steuereinrichtung dem Menschen Teile seiner Arbeit abnimmt und ihn zumindest zeitweise aus dem Funktionsablauf herauslöst, kann von einer *automatischen Steuerung* gesprochen werden. Sie gliedert sich in Elemente und Baugruppen zur Informationseingabe, -verarbeitung und -ausgabe bzw. -nutzung. Je nach Wirkungsweise werden unterschiedliche Arten automatischer Steuereinrichtungen unterschieden.

Führungssteuerung. Bei dieser Steuerung bestimmt eine für den zu steuernden Prozeß charakteristische Größe, die *Führungsgröße*, den Steuerungsablauf. Weil dabei die Stelleinrichtung der Führungsgröße folgt, wird dafür auch die Bezeichnung *Folgesteuerung* benutzt. Führungssteuerungen sind artverwandt mit Regelungen; denn wenn man einen Regelkreis an der Stelle auftrennt, wo die Meßeinrichtung den Meßwert am Objekt abgreift, verhält er sich ebenfalls wie eine Führungssteuerung.

Zeitplansteuerung. Hierbei wird in einen *Zeitplangeber* ein Programm eingegeben, das die Betätigung des Stellglieds bzw. der Stellglieder völlig bestimmt. Andere äußere Einflüsse werden nicht berücksichtigt. Es ergibt sich ein starrer Ablauf, dessen einziger Parameter die Zeit ist.

Der Zeitplangeber, häufig auch als *Programmgeber* bezeichnet, besteht meist aus einer Nokkenwalze, die von einem Synchronmotor über ein Getriebe mit konstanter Drehzahl angetrieben wird. Die einstellbaren Nocken betätigen während des Umlaufs zu festgelegten Zeitpunkten die ihnen zugeordneten Schalter, die ihrerseits die Stellglieder ein- und ausschalten.
Der zeitliche Ablauf wird durch ein *Schaltfolgediagramm* dargestellt, dessen Programmdauer T sich aus einer endlichen Zahl meist ungleich langer Takte zusammensetzt. Nach Programmablauf erfolgt selbsttätige Stillsetzung oder ein erneuter Start am Programmanfang. Zeitplansteuerungen sind dann einzusetzen, wenn die zu steuernden Vorgänge in immer gleichem zeitlichem Ablauf vor sich gehen sollen.
Ablaufsteuerung. Bei einer Ablaufsteuerung ist die gesteuerte Größe von den Zuständen bzw. Abläufen bestimmter Größen in der Anlage und von einem gespeicherten Programm abhängig. Das Programm gibt an, in welcher Weise die Beziehung zwischen den Ausgangsgrößen und den erfaßten Größen in der Steuerung herzustellen ist. Der gesamte Ablauf läßt sich auch hier, wie bei der Zeitplansteuerung, in einzelne Takte zerlegen. Beginn und Ende eines jeden Taktes werden durch das Erreichen eines bestimmten Schaltzustands am gesteuerten Objekt oder durch einen Zeitablauf im Programmspeicher bestimmt.
Zeitplan- und Ablaufsteuerungen werden häufig unter dem gemeinsamen Begriff *Programmsteuerung* zusammengefaßt.

14.2.6. Digitale Steuerungen und Regelungen

Digitale Steuerungen sind durch die Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe binärer und kodierter digitaler Signale im Sinne einer automatischen Steuerung gekennzeichnet. Sie treten in allen Bereichen der industriellen Technik auf.
Informationseingabe. Zur Informationseingabe werden bei digitalen Steuerungen Taster, Schalter, Zeitplangeber und Meßeinrichtungen mit Grenzwertgebern benutzt. Sie liefern binäre Signale bzw. Impulssignale an den zentralen Informationsverarbeitungsteil der Steuerung.
Informationsverarbeitung. Die Verarbeitung der eingegebenen Signale erfolgt durch

	Eingangssignal	*Ausgangssignal*
Verknüpfen	binär	binär
Speichern	binär	binär
Verzögern	binär	binär
Zählen	Impulse	digital
Rechnen	digital	digital

Die *Verknüpfung* binärer Signale durch Verknüpfungsglieder, auch als *Logikglieder* bezeichnet, hat dabei die größte Bedeutung. Abb. 14.2.6-1 gibt eine Auswahl davon mit jeweils 2 Eingängen dargestellt wieder. Diese Glieder werden durch Relais- oder kontaktlose Halbleiterschaltungen realisiert. Mehrere Verknüpfungsglieder können in einer integrierten Schaltung (engl. *integrated circuit, IC*) gemeinsam

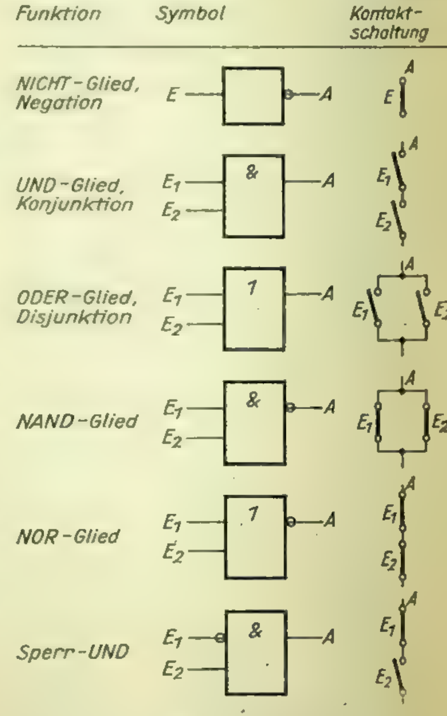


Abb. 14.2.6-1 Verknüpfungsglieder

hergestellt werden. Zusammen mit Speichergliedern, Verzögerungsgliedern und Zählern sowie Ausgangsverstärkern werden aus Verknüpfungsgliedern *Baugruppensysteme* für industrielle Steuerungen, z. B. das System TRANSLOG 2, aufgebaut. Derartige Systeme sind durch einheitliche funktionelle und konstruktive Parameter sowie Einsatzbedingungen gekennzeichnet.
Speicher sind in der Lage, ein oder mehrere binäre Signale für unbegrenzte Zeit zu speichern (vgl. 14.3.3.). Sie können ebenfalls als Relaisschaltung oder mit Halbleiterbauelementen bzw. in einem Schaltkreis realisiert werden. Als kontaktlose Schaltung werden sie gewöhnlich als *bistabiler Multivibrator* (engl. flip flop) aufgebaut.
Verzögerungsglieder, auch als Zeit- bzw. Laufzeitglieder bezeichnet, verzögern ein Ausgangssignal gegenüber dem Eingangssignal um eine definierte Zeit, die im Bereich von Mikrosekunden bis zu Stunden liegen kann. Der Zeitbereich

bis zu ≈ 1 min wird von elektronischen Schaltungen beherrscht, deren zeitbestimmendes Glied ein Kondensator mit einem Lade- oder Entladewiderstand, ein sog. *RC*-Glied, ist.
Zählschaltungen können ebenfalls Bestandteil von Steuerungen sein, insbesondere in der Stückgutfertigung. Ein elektrischer Zählvorgang ist gleichbedeutend mit dem Aufaddieren, d. h. Vorwärtszählen, oder Subtrahieren, d. h. Rückwärtszählen, von elektrischen Impulsen. Der Zählbetrag wird bei elektromechanischen Impulszählern im Dezimalkode gebildet und auf Zahlenrollen angezeigt. Im Gegensatz dazu arbeiten elektronische Zählschaltungen allgemein in einem Binärkode (vgl. 14.3.2.).
Analoge oder digitale *Rechenschaltungen* sind Bestandteil numerischer Steuerungen (vgl. 14.3.7.). Sie werden aber auch zur Korrektur von Meßwerten sowie zur Berechnung von Führungsgrößen verwendet. Analoge Rechenschaltungen vgl. 14.3.1., digitale Rechenschaltungen vgl. 14.3.2.
Informationsausgabe und -nutzung. Binäre Signale werden dem Menschen im Sinne der *Informationsausgabe* durch Signallampen angezeigt bzw. durch Hupen hörbar gemacht. Damit erhält der Bedienende Informationen über Zustände im gesteuerten Prozeß. Codierte digitale Signale werden durch Ziffernanzeigeelemente angezeigt oder durch Zifferndrucker ausgedruckt.
Zur *Informationsnutzung* werden binäre Signale nach entsprechender Verstärkung Schaltgeräten, Thyristorschaltstufen oder Elektromotoren bzw. Magnetventilen, -kupplungen und -bremsen zugeführt, um diese entsprechend dem Steueralgorithmus zu betätigen.
Digitale Regelungen. Ein Sonderfall der in 14.2.3. beschriebenen Regler und Regeleinrichtungen ist die *digitale Mehrfachregelung* (engl. direct digital control, *DDC*). Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß eine größere Anzahl von Regelkreisen durch einen Digitalrechner „bedient" wird, der als prozeßgekoppelter Rechner arbeitet. Entsprechend der Prinzipdarstellung in der Abb. 14.2.6-2 werden die den einzelnen Regelkreisen zugeordneten Meßwerte, also die Istwerte der Regelgröße, über einen Meßstellenumschalter zyklisch abgefragt, in einen digitalen Kode umgesetzt und dem Rechner nacheinander zugeführt. Dieser ermittelt daraus und aus der gespeicherten Führungsgröße die Stellgröße, die bis zum nächsten Zyklus zwischengespeichert und dem Stellglied zugeführt wird. In dieser Zeit läuft das Stellglied in die „errechnete" Position und bleibt dort stehen, bis ein anderer Stellbefehl eintrifft. Ein schneller Digitalrechner kann so 50 bis 200 Regelkreise steuern und auch das Zusammenwirken bestimmter Regelkreise beherrschen. An seine Zuverlässigkeit werden besonders hohe Anforderungen gestellt, da bei seinem Ausfall alle Regelkreise außer Funktion sind. Es ist daher erforderlich, im Havariefall die gesamte Anlage in einen ungefährlichen Betriebszustand zu fahren oder auf konventionelle Regler, die für diesen Fall in Reserve (engl. back-up) gehalten werden, umzuschalten.

14.2.7. Fernwirktechnik

Einrichtungen und Verfahren der *Fernwirktechnik* dienen der Übertragung von Steuerbefehlen, Meldungen und Meßwerten in Verbindung mit Aufgaben der *Fernsteuerung, -überwachung* und *-messung*. In manchen Fällen werden durch eine Fernwirkeinrichtung gleichzeitig 2 dieser Aufgaben gelöst, z. B. die Fernsteuerung von Pumpen und Ventilen im Leitungszug einer Pipeline und die Fernüberwachung von Drücken, Durchflüssen und Ventilstellungen.
Steuerbefehle, Meldungen und Meßwerte gehören zu den „nicht willkürlich änderbaren Informationen". Sie werden in Fernwirkeinrichtungen zwischen Menschen und technischen Einrichtungen sowie zwischen technischen Einrichtungen untereinander ausgetauscht. Im Gegensatz dazu gehört der Austausch „willkürlich änderbarer Informationen" zwischen Menschen untereinander, wie das typisch für Fernsprechen, Fernschreiben sowie für Rundfunk und Fernsehen ist, nicht zur Fernwirktechnik, sondern zur Nachrichtentechnik.
Charakteristisch für Fernwirkeinrichtungen ist nicht in erster Linie die Überbrückung großer Entfernungen, sondern die Umformung der Signale in eine für die möglichst fehlerfreie Übertragung besonders geeignete Form. Dazu eignen

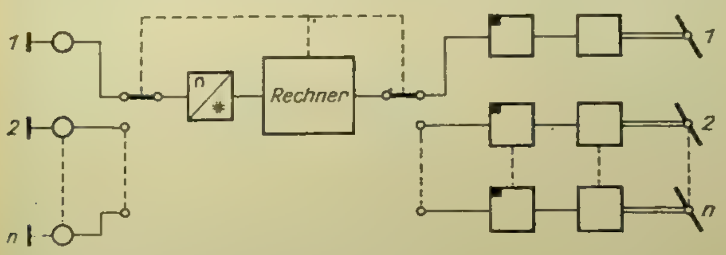


Abb. 14.2.6-2 Digitale Mehrfachregelung

sich vor allem Tonfrequenzen und Impulsfolgen. Sie gestatten auch die Mehrfachausnutzung von Übertragungskanälen.

Übertragungskanäle. Fernwirkeinrichtungen arbeiten mit elektrischer Hilfsenergie. Als *Übertragungskanäle* werden benutzt:

Kabel und Freileitungen:
insbesondere Fernsprechkanäle,
Induktionsschleife:
innerhalb von Werkhallen und Betriebsteilen,
Funkstrecken:
Sender und Empfänger im UKW-Bereich

Die Benutzung von *Fernsprechkanälen* erfordert die Beschränkung auf Frequenzen im Bereich 300 bis 3400 Hz bzw. auf entsprechende Impulsfolgefrequenzen. Der Vorteil von Fernsprechkanälen liegt in der Überbrückung auch großer Entfernungen in beiden Richtungen, da die im Leitungszug angeordneten Verstärker mitbenutzt werden können. Ein anderer leitungsgebundener Übertragungskanal ist die Trägerfrequenzübertragung auf Hochspannungsfreileitungen (*TFH*), die von Energieversorgungsunternehmen bevorzugt wird. Dabei werden die Trägerfrequenzen über Kondensatoren in der Sendestelle auf die Hochspannungsleitung ein- und in der Empfangsstelle ausgekoppelt.

Induktionsschleifen und *Funkstrecken* ermöglichen z. B. die drahtlose Fernsteuerung von Kranen, Rangierlokomotiven und Fördermitteln im Sichtbereich durch einen Bedienenden, der mit einem meist tragbaren Steuergerät und Sender ausgerüstet ist.

Zeitmultiplex-Verfahren. Bei der zeitmultiplexen Übertragung von Steuerbefehlen, Meldungen und Meßwerten werden Impulsfolgen auf den Übertragungskanal gegeben, die in codierter Form alle erforderlichen Informationen über das zu steuernde Objekt, die Meßstelle sowie über die Art der Schalthandlung bzw. den Meßwert enthalten.

Durch verschiedene Arten der Sicherstellung müssen bei der Fernsteuerung wichtiger Objekte Fehlschaltungen vermieden werden. Eine Methode besteht darin, das an die gesteuerte Stelle übermittelte Impulstelegramm dort zunächst zu speichern; darauf wird es an die steuernde Stelle zurückübertragen und dort mit dem ursprünglichen Impulsbild verglichen. Bei Übereinstimmung wird durch eine erneut übertragene Impulsfolge die eigentliche Schalthandlung, z. B. „Leistungsschalter 3 AUS", ausgelöst und der Vollzug an die steuernde Stelle zurückgemeldet. Alle diese Vorgänge laufen selbsttätig ab.

Die einzelnen Impulse bilden binäre Signale ab, so wird z. B. ein 0-Signal durch einen schmalen Impuls, ein L-Signal durch einen breiten Impuls dargestellt. Mehrstellige binäre Signale und Zifferninformationen werden durch Gruppen codierter Impulse abgebildet, z. B. unter Verwendung des Dual- oder BCD-Kodes (14.3.2.). Das ermöglicht die fehlerfreie digitale Übertragung von Meßwerten.

Frequenzmultiplex-Verfahren. Bei frequenzmultiplexer Übertragung (vgl. 11.4.2.) wird ein Gemisch von Tonfrequenzen auf den Übertragungskanal gegeben, und am Empfangsort werden die einzelnen Frequenzen durch Bandpässe getrennt und den zugeordneten Umsetzern zugeführt. Im Frequenzbereich der Fernsprechkanäle, also zwischen 300 und 3400 Hz, lassen sich ≈ 22 Tonfrequenzen so unterbringen, daß sie sich nicht gegenseitig stören und mit vertretbarem Aufwand ausgefiltert werden können. Das ist gleichbedeutend mit der gleichzeitigen Übertragung von max. 22 binären Steuer- oder Meldesignalen, wenn durch jede Frequenz ein binäres Signal dargestellt wird. Auf der Sendeseite werden die Tonfrequenzgeber in der benötigten Anzahl sowie ein Mischverstärker installiert. Jeder Geber erzeugt eine ihm eigene konstante Frequenz, sobald er mit einem binären Signal, etwa durch Betätigung eines Schalters, angesteuert wird. Der ihm zugeordnete Umsetzer auf der Empfangsseite gibt dann ein binäres Signal ab, das zur Signalisierung oder zur Betätigung einer Schalteinrichtung benutzt werden kann (Abb. 14.2.7-1).

*T*onfrequenz-*M*ultiplex-*F*ernsteuerungen (*TMF*) werden vielfältig zur Steuerung von Schaltanlagen, Pumpen, Talsperren, Kranen, Fördermitteln und Schienenfahrzeugen eingesetzt. Da sie „kraftschlüssig" arbeiten, erfolgt bei einer möglichen Unterbrechung im Übertragungskanal die selbsttätige Stillsetzung des gesteuerten Objekts, so daß größerer Schaden vermieden wird. Meßwerte können in codierter Form wie beim Zeitmultiplex-Verfahren übertragen werden, indem z. B. 4 Frequenzen den 4 bit einer BCD-codierten Dezimalziffer zugeordnet werden (BCD = binary coded decimal; duale Codierung jeder einzelnen Dezimalziffer).

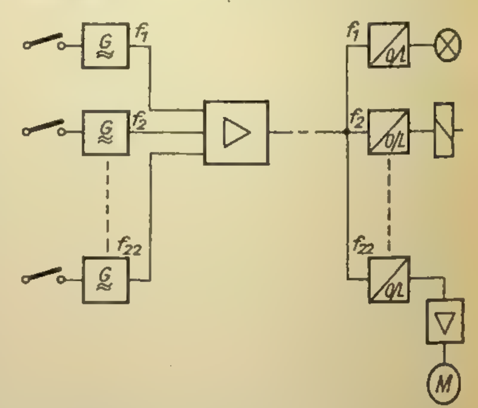


Abb. 14.2.7-1 Prinzip des Frequenzmultiplex-Verfahrens

Betriebsarten und Anwendungsgebiete. Fernwirkeinrichtungen werden zur Steuerung und Überwachung räumlich entfernter und verzweigter Anlagenteile, Geräte und Maschinen, aber auch zur Steuerung im Nahbereich eingesetzt. In der Struktur der Anlage sind der Endstellenverkehr, der Linienverkehr – meist längs einer Bahnlinie, eines Rohrstrangs oder einer Freileitung – und der Sternverkehr zu unterscheiden. Charakteristische Anwendungsgebiete der Fernwirktechnik sind die Energie- und Wasserversorgung, Ferngasnetze, Netze von Sendern und Relaisstationen sowie die Bahnstromversorgung. Auch die Signale, Weichen und Schranken längs einer Eisenbahnstrecke können von einer zentralen Stelle mit den Mitteln der Fernwirktechnik ferngesteuert werden.

14.3. Rechentechnik und Datenverarbeitung

14.3.1. Analoge Rechenautomaten

Ein analoger Rechenautomat ist ein Automat mit analogen Rechenfunktionseinheiten zum Aufbau von Verhaltensmodellen dynamischer Systeme. Mathematisch formuliert entspricht diese Modellbildung der Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen. Der analoge Rechenautomat hat für jede zu realisierende Operation einer zu lösenden Funktion eine gesonderte Rechenschaltung. Die Rechengrößen sind Amplituden von Spannungen. Die Verarbeitung erfolgt in Rechenschaltungen bzw. -funktionseinheiten in paralleler Arbeitsweise. Im Gegensatz zum Digitalrechner, der die erforderlichen Operationen zeitlich nacheinander ausführt, bearbeitet der analoge Rechenautomat eine Aufgabe durch zeitgleiche, simultane Lösung aller in ihr enthaltenen Operationen. Die Verschaltung der Funktionseinheiten beim analogen Rechenautomat entspricht der Programmierung beim Digitalrechner.
Hauptelemente des analogen Rechenautomaten sind die *Rechenfunktionseinheiten* einschließlich sog. Funktionsgeneratoren. Alle anderen Geräte und Einrichtungen dienen der Steuerung, Programmierung, Auswertung, Kontrolle usw. von Rechenfunktionseinheiten.

Rechenfunktionseinheiten des analogen Rechenautomaten. In Abb. 14.3.1-1 sind mögliche Rechenfunktionseinheiten, deren Symbole und Operationen dargestellt.
Die eingegebenen Größen x_{ei} als analoge elektrische Spannungswerte werden entsprechend der Rechenoperation so verarbeitet, daß das Resultat x_a an der Dreieckspitze zur Verfügung steht. In der anderen Richtung wirken die Rechenfunktionseinheiten nicht, d. h. sie sind rückwirkungsfrei. Wenn z. B. die Größen x_{e1} und x_{e2} addiert werden sollen, so werden sie auf die mit

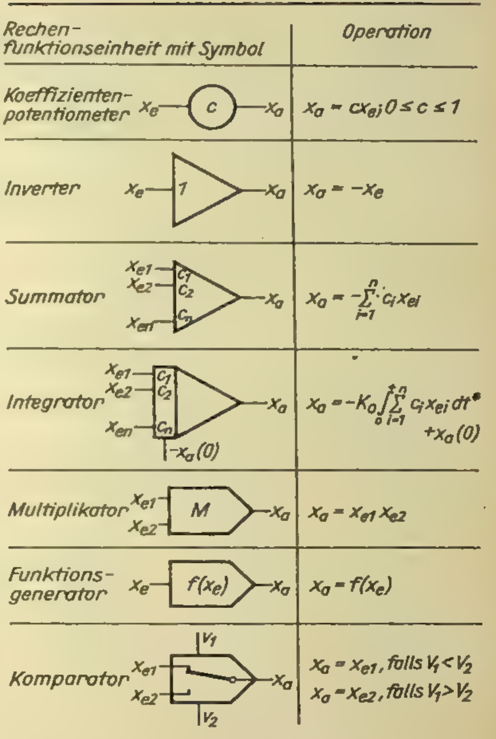


Abb. 14.3.1-1 Symbole und Operationen möglicher Rechenfunktionseinheiten

Eins bewerteten Eingänge des Summators gegeben (d. h. $c_1 = c_2 = 1$) und am Ausgang $x_a = -(x_{e1} + x_{e2})$ als Resultat abgelesen.
Falls die Größe x_{ei} mit einem Koeffizienten c ($0 \leqq c \leqq 1$) multipliziert werden soll, wird sie auf ein Potentiometer geschaltet. Das Potentiometer entspricht einem Spannungsteiler und wird *Koeffizientenpotentiometer* genannt. An dessen Ausgang ergibt sich der Wert $x_a = cx_{ei}$.
Die unabhängige Variable ist stets die Zeit und die abhängige Variable die Rechengröße bzw. die dazu äquivalente Spannung. Mit *Funktionsgenerator*, auch *Funktionsgeber* bzw. *-bildner* genannt, wird eine analoge Rechenschaltung, realisiert in Form einer Rechenfunktionseinheit, bezeichnet, durch die man beliebige nichtlineare Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen herstellen kann. Durch Funktionsgeneratoren werden u. a. beliebige Polygonzüge, Rechteck- und Dreiecksschwingungen sowie sog. Sprungfunktionen mittels Anwendung von Diodenschaltungen, Summatoren, Integratoren und Komparatoren realisiert.

Operationsverstärker. Um entsprechend dem Programmierprinzip die analogen Rechenfunktionseinheiten zusammenschalten zu können, müssen die Rechenschaltungen rückwirkungsfrei

sein. Dazu dienen Operationsverstärker. Diese sind lineare Schaltungen (Verstärker), die durch äußere Beschaltung mit passiven Elementen (Widerstände, Kondensatoren, Dioden) unterschiedliche Übertragungscharakteristiken annehmen können. Der Operationsverstärker wird als mehrstufiger Gleichspannungsverstärker beim heutigen Stand der Technik als integrierter Schaltkreis ausgeführt.

An einen idealen Operationsverstärker werden folgende Forderungen gestellt:

1. hohe Spannungsverstärkung, die durch Hintereinanderschaltung mehrerer Verstärkerstufen erreicht wird;
2. möglichst geringe Drift, die vor allem die Dauer der Rechenzeit beim analogen Rechenautomat bestimmt. Gibt man z. B. den Ausgang eines driftenden Verstärkers auf den Eingang eines Integrators, so summiert der Integrator die Nullpunktschwankungen. Nach einer bestimmten Rechenzeit kann die Ausgangsspannung des Integrators Werte erreichen, die in einigen analogen Rechenschaltungen zu nicht annehmbaren Fehlern führen können;
3. nur kleiner Belastungsfehler eines Ausgangs, wenn weitere Rechenfunktionseinheiten an diesen angeschlossen werden. Das erfordert einen geringen Innenwiderstand des Ausgangs x_a gegenüber den Eingängen der Rechenfunktionseinheiten;
4. großer linearer Aussteuerungsbereich, da mit möglichst großen Spannungen gerechnet wird, um kleine relative Fehler bei der analogen Rechnung zu erhalten;
5. möglichst große Bandbreite, d. h. der Operationsverstärker soll auch zeitlich sehr kurze Signale ohne Verzerrungen übertragen;
6. Stabilität in allen wichtigen Betriebsarten (Integrator, Summator u. a.).

Programmierung von analogen Rechenautomaten ist die problemorientierte Verschaltung der erforderlichen Rechenfunktionseinheiten. Auf dem *Programmierfeld*, dem „Steckbrett" zur Herstellung der gewünschten Verknüpfungen, werden die Ein- und Ausgänge aller Rechenfunktionseinheiten in Form von Steckbuchsen angeordnet und die erforderlichen Verbindungen mittels Verbindungsleitungen und Steckern realisiert. Meist ist das Programmierfeld auswechselbar. Man kann dann die Schaltung auf einem Programmierfeld gesteckt lassen und bis zu einer späteren Verwendung gegen ein anderes zur Programmierung eines weiteren Problems auswechseln.

Das Programmieren von analogen Rechenautomaten gliedert sich in folgende Schritte:

1. Normierung der Gleichungen und Einführung von Maßstabsfaktoren zwecks Vermeidung von Übersteuerung der Rechenschaltung sowie Anpassung analoger Spannungswerte an deren Arbeitsbereich;
2. Entwurf einer Schaltungsskizze für die Verschaltung der notwendigen Rechenfunktionseinheiten zur Lösung des Problems;
3. Realisierung der Schaltung auf dem Analogrechner durch die erforderlichen Verbindungen auf dem Programmierfeld zwischen den einzelnen Rechenfunktionseinheiten;
4. Prüfung der Schaltung.

Wenn die Aufgabenstellung durch eine bereits normierte Differentialgleichung vorliegt, besteht das Verfahren zum Entwurf einer Schaltungsskizze darin, a) nach der höchsten auftretenden Ableitung aufzulösen; b) diese bei einer Differentialgleichung n-ter Ordnung n-mal hintereinander mittels Integrator zu integrieren, so daß man alle niederen Ableitungen und die gesuchte Größe selbst erhält; c) die höchste auftretende Ableitung entsprechend der Gleichung aus den Ableitungen niederer Ordnung und der gesuchten Größe selbst durch Rückführung auf den ersten Integrator zu erzeugen (Abb. 14.3.1-2).

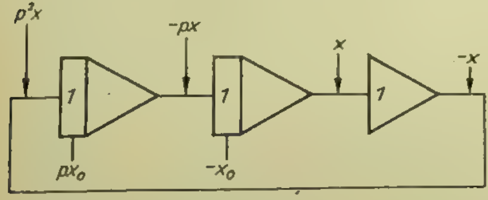


Abb. 14.3.1-2 Schaltungsskizze für die Gleichung $p^2x + x = 0$

Anwendung von analogen Rechenautomaten. Der Einsatz erfolgt u. a. auf folgenden Gebieten:

Elektrotechnik: Analyse und Synthese linearer und nichtlinearer Netzwerke, Analyse und Synthese aktiver Schaltungen, Untersuchung dynamischer Vorgänge in elektrischen Maschinen und Transformatoren;

Automatisierungstechnik: Analyse und Synthese optimaler Regelungssysteme, Kennwertermittlung (deterministische und stochastische Verfahren), Stabilitätsanalyse, Simulation des Zeitverhaltens von Übertragungsgliedern (vgl. 14.2.1.) sowie Analyse und Synthese von Systemen mit Prozeßrechnern (vgl. 14.3.6);

Reaktortechnik: Nachbildung der Reaktorkinetik (direkte oder verzögerte Neutronen, Xenonvergiftung, Wärmeübertrager), Reaktorsimulator und Analyse und Synthese von Systemen, Reaktorregelungen;

Maschinenbau: Schwingungsuntersuchungen, Resonanzuntersuchungen, Lösung von Eigenwertproblemen, Nachbildung hydraulischer und pneumatischer Vorgänge, Untersuchung von Aufgaben der nichtlinearen Mechanik und Untersuchung von Druckwellen in Rohrleitungen;

Verfahrenstechnik: Untersuchung von wärmetechnischen Vorgängen, verfahrenstechnischen Regelungen und chemischen Reaktionen;

Flugzeugindustrie: Flugsimulator, für Flugbahnberechnungen, Untersuchung von automatischen Lenksystemen, Regelungen von Flugkörpern, Klimaregelungen für Kabinenräume, Untersuchung von Aufgaben der Steuerung von Flugkörpern und zur Untersuchung von aerodynamischen Problemen;
Biokybernetik: Untersuchung von Regelungsvorgängen in der Biologie (z. B. Blutdruck- und Blutzuckerregelungen beim Menschen);
ökonomische Kybernetik: Untersuchung von rückgekoppelten dynamischen Vorgängen von Reproduktionsprozessen von ökonomischen Systemen.

Hybride Rechenautomaten. Ein Rechenautomat, der aus einer Kopplung eines Digitalrechners (vgl. 14.3.3.) mit einem analogen Rechenautomaten besteht, wird hybrider Rechenautomat oder *Hybridrechner* genannt. Er kann im einfachsten Falle aus einem mit analogen Elementen ergänzten Digitalrechner oder aus einem mit digitalen Elementen ergänzten analogen Rechenautomaten bestehen. Der hybride Rechenautomat vereinigt die Vorteile beider Typen von Rechenautomaten, d. h. einfache Simulation dynamischer Vorgänge mit der Möglichkeit hoher Rechengenauigkeit einschließlich Speicherfähigkeit von Rechenergebnissen. Voraussetzung dafür ist die externe Steuerbarkeit des analogen Rechenautomaten durch den Digitalrechner und umgekehrt. Außerdem ist die Umsetzung der analogen in die digitale Signalform und umgekehrt erforderlich. Diese notwendige Umsetzung übernehmen *Analog-Digital-(A/D)Umsetzer* bzw. *Digital-Analog-(D/A)*Umsetzer, die technologisch derzeitig in elektronisch-integrierter Schaltkreistechnik zu realisieren sind. Im allgemeinen erfordert die Kopplung beider Systeme eine Zwischenspeicherung des Datenverkehrs, weil die Eingabe in das Eingaberegister des Digitalrechners nicht immer im Rhythmus der Anlieferung der umgewandelten Werte des Analog-Digital-Umsetzers erfolgt.

Es existieren folgende Möglichkeiten der Kopplung beider Automaten:

1. Übertragung von Rechendaten zwischen analogen und digitalen Rechenautomaten. Sie erfordert die Anpassung des umgesetzten Digitalwortes (vgl. 14.3.2.) an die im Digitalrechner benötigte Form (Wortlänge, Kodierung). Die Verwendung der übertragenen Rechendaten erfolgt nach Aufruf durch das ablaufende Digitalrechnerprogramm.
2. Übertragung von Rechendaten vom digitalen zum analogen Rechenautomaten. Sie erfolgt nach Speicherung auf gesonderten Speicherplätzen im Arbeitsspeicher des Digitalrechners. Die Daten werden durch einen Ausgabebefehl des Digitalrechnerprogramms an eine Zwischenelektronik übergeben. Diese übergibt die Werte nach Umsetzung in einen D/A-Umsetzer über vom Digitalrechnerprogramm adressierte Datenkanäle an den analogen Rechenautomaten. D/A-Umsetzer können auch als Multiplikatoren für Produkte aus einer digitalen und einer analogen Größe aufgebaut werden. Dabei steht am Ausgang das Produkt als analoge Spannung zur Verfügung. Man kann somit den D/A-Umsetzer speziell als digital gesteuertes Potentiometer im Programm des analogen Rechenautomaten einsetzen.
3. Übertragung von Steuerkommandos vom digitalen zum analogen Rechenautomaten. Der Digitalrechner kann durch Ausgabe binärer Signale sowohl die gewünschte Betriebsart des analogen Rechenautomaten als auch digitale Baugruppen, Integratoren und das Digital-Analog-Schalten des hybriden Systems steuern.
4. Meldung von binären Betriebszuständen des analogen Rechenautomaten und binärer Informationen an den Digitalrechner. Der Digitalrechner kann in Abhängigkeit von diesen Signalen z. B. Programmverzweigungen vornehmen.

Tab. 14.3.1-3 zeigt die Aufgaben beider Teilsysteme bei einzelnen Anwendungsklassen.

Tab. 14.3.1-3 *Aufgabenverteilung beim Hybridrechner*

Anwendungsklassen	Aufgaben des Analogrechners	Aufgaben des Digitalrechners
alternierende Arbeitsweise beider Rechner (nicht zeitkritisch)	Lösung der Zustandsgleichung	Suchalgorithmen und Speicherung
simultane Arbeitsweise (zeitkritisch)	Integration sowie weitere lineare Operationen, einfache nichtlineare Operationen	komplizierte nichtlineare Operationen, Speicherung
	Teilsysteme (hohe Rechengeschwindigkeit und niedrige Lösungsgenauigkeit)	Teilsysteme niedrige Rechengeschwindigkeit und hohe Lösungsgenauigkeit)

14.3.2. Grundlagen der digitalen Informationsverarbeitung

Die Digitaltechnik begründet sich auf die Anwendung binärer Schaltstufen, die Voraussetzung für die Darstellung der Binärziffern sind. Ein *binäres Signal* kann nur 2 Zustände, nämlich *0* und *L*, kennzeichnen. Soll eine stetig veränderliche Größe für eine digitale Informationsverarbeitung feinstufiger als binär unterschieden werden, so muß man auf mehrere Binärstellen zurückgreifen und binäre Signalgruppen bilden.

Wenn mit einer Binärstelle nur 2^1 Zustände (Werte) gekennzeichnet werden können, so

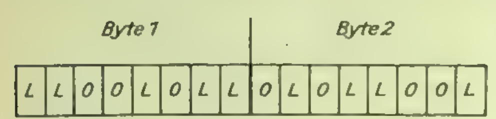


Abb. 14.3.2-1 *Wortdarstellung der digitalen Informationsverarbeitung*

können mit *n* Binärstellen 2^n Signalstufungen vorgenommen werden. Soll z. B. eine stetig veränderliche Größe mit einer Genauigkeit von 1% durch eine binäre Signalgruppe dargestellt werden, sind 7 Binärstellen ($2^7 = 128$) notwendig, bei 1‰ 10 Binärstellen ($2^{10} = 1024$).

Zur praktischen Anwendung und zahlenmäßigen Bewertung der binären Signalgruppen werden die einzelnen binären Signale der Gruppe bewertet, d. h. es wird eine *Kodierung* vorgenommen. Die Kodierung kann in unterschiedlicher Weise erfolgen. Die zur Darstellung einer stetig veränderlichen Größe notwendigen Binärstellen werden zu sog. *Worten* zusammengefaßt. Die Länge eines Wortes entspricht der Anzahl der Binärstellen, die als sog. *Bits* bezeichnet werden. In der Technik der Informationsverarbeitung (Datenverarbeitung) sind Wortlängen von 8, 12, 16, 24, 48, 64 Bits üblich. Die untergeordneten Einheiten eines Wortes können sog. *Zeichen* (z. B. 6 Bit) oder *Bytes* (8 Bits) sein. Neben Ziffern werden in Form von Zeichen und Bytes auch Buchstaben, Satz- und Sonderzeichen in digitaler Form (durch eine Kombination von Binärwerten) kodiert. Die Darstellung in Worten bzw. Bytes spielt eine große Rolle in der digitalen Rechentechnik (Abb. 14.3.2-1).

Rechnen mit Dualzahlen. Das Darstellen von Zahlen mit Hilfe binärer Signale im dualen Zahlensystem basiert auf der Summenbildung gemäß $Z = a_n \cdot 2^n + a_{n-1} 2^{n-1} + \ldots + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0$.
Für die Zahl 91 z. B. gilt:

$$1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 91$$
$$64 + 0 + 16 + 8 + 0 + 2 + 1 = 91$$

Die Dualzahl lautet L0LL0LL.

Für das Addieren und Multiplizieren einzelner Dualziffern ergeben sich einfache Rechenregeln, die auch schaltungstechnisch relativ leicht zu verwirklichen sind.

Addition	*Multiplikation*
0 + 0 = 0	0 · 0 = 0
0 + L = L	0 · L = 0
L + 0 = L	L · 0 = 0
L + L = (L) 0	L · L = L

(L) entspricht einem Übertrag für die nächsthöhere Dualstelle.

Die Additionsfunktion wird mittels einer sog. ANTIVALENZ-Funktion verwirklicht. Die vollständige Additionsfunktion muß die Bildung eines Übertrags berücksichtigen. Die Realisierung erfolgt über integrierte Adder-Schaltkreise. Die Multiplikationsregeln für einzelne Dualziffern basieren auf der logischen UND-Funktion.

Binärkodes für Dezimalzahlen. Das Dualsystem eignet sich für die Zahldarstellung mit binären Signalen insbesondere für die interne Verarbeitung in Digitalrechnern. Für die Ein- und Ausgabe in peripheren Einrichtungen muß eine Umsetzung in das Dezimalsystem vorgenommen werden, um eine für den Menschen verständliche Form der Darstellung zu bieten. Das betrifft u. a.
- Zähleinrichtungen,
- Anzeigeeinrichtungen,
- Eingabeeinrichtungen über Tastaturen.

Dezimalzahlen	Dualsystem 8 4 2 1		BCD-Kode 8 4 2 1		Aiken-Kode 2 4 2 1		3-Exzeß-Kode
0	0 0 0 0	0	0 0 0 0	0	0 0 0 0		keine Zuordnung
1	0 0 0 L	1	0 0 0 L	1	0 0 0 L		
2	0 0 L 0	2	0 0 L 0	2	0 0 L 0		
3	0 0 L L	3	0 0 L L	3	0 0 L L	0	0 0 L L
4	0 L 0 0	4	0 L 0 0	4	0 L 0 0	1	0 L 0 0
5	0 L 0 L	5	0 L 0 L		Aiken-Korrektur	2	0 L 0 L
6	0 L L 0	6	0 L L 0			3	0 L L 0
7	0 L L L	7	0 L L L			4	0 L L L
8	L 0 0 0	8	L 0 0 0			5	L 0 0 0
9	L 0 0 L	9	L 0 0 L			6	L 0 0 L
10	L 0 L 0		BCD-Korrektur			7	L 0 L 0
11	L 0 L L			5	L 0 L L	8	L 0 L L
12	L L 0 0			6	L L 0 0	9	L L 0 0
13	L L 0 L			7	L L 0 L		
14	L L L 0			8	L L L 0		
15	L L L L			9	L L L L		
Stellen:	D C B A		D C B A		D C B A		D C B A

(Stellenwerte: Dualsystem 8 4 2 1; BCD-Kode 8 4 2 1; Aiken-Kode 2 4 2 1; 3-Exzeß-Kode keine Zuordnung)

Abb. 14.3.2-2 *Tetradische Kodes im Vergleich zum Dualsystem*

Dazu muß eine Möglichkeit geschaffen werden, Dezimalzahlen binärkodiert darzustellen. Die Binärkodes zeichnen sich dadurch aus, daß die dezimale Zahlenstruktur erhalten bleibt, d. h., jede Dekade wird getrennt in eine Dualzahl oder in einen anderen Binärkode umgesetzt.
Aus der Vielzahl der möglichen Kodes sollen die wichtigsten erläutert werden.
Tetradische Kodes. Jede Dekade wird durch eine *Tetrade*, d. h. durch eine Gruppe von 4 binären Signalen, dargestellt (Abb. 14.3.2-2). 10 der $2^4 = 16$ Kombinationsmöglichkeiten einer Tetrade werden je nach Kode den Ziffern 0 bis 9 zugeordnet, die nicht verwendeten Kombinationen werden *Pseudotetraden genannt.*
Der *binär-kodierte Dezimalkode* (*BCD-Kode* oder *8-4-2-1-Kode*) verwendet die ersten 10 Kombinationen des Dualsystems. Die Zahl 91 stellt sich wie folgt dar: LOOL OOOL ≙ 91.
Die Pseudotetraden 10 bis 15 müssen mittels sog. *BCD-Korrektur* übersprungen werden, um z. B. bei Additions- oder Zählvorgängen keine falschen Ergebnisse zu erhalten. Die Entschlüsselung (Dekodierung) der Tetrade wird unter Zuhilfenahme der Stellenwerte realisiert, um nach der binären Informationsverarbeitung die entsprechenden Dezimalzahlen zu erhalten.
Der *Aiken-Kode* (*2-4-2-1-Kode*) verwendet die ersten und letzten 5 der möglichen Kombinationen einer Tetrade. Die dazwischen liegenden Pseudotetraden müssen mittels der sog. *Aiken-Korrektur* übersprungen werden. Der Vorteil dieses Kodes besteht darin, daß der Übertrag der Dekade (Übergang von 9 auf 0) identisch ist mit dem Übertrag der Dualzahldarstellung (Übergang von LLLL auf OOOO. Nach Aiken kodiert stellt sich die Zahl 91 als LLLLOOOL ≙ 91 dar.
Beim *3-Exzeß-Kode*, auch *Stibitz-Kode* genannt, werden die ersten und letzten 3 Kombinationen nicht verwendet.
Die Zahl 91 wird durch LLOO OLOO ≙ 91 gebildet. Als nicht bewertbarer Kode ist er für die eigentliche Informationsverarbeitung wenig geeignet. Weitere Kode-Arten haben die Eigenschaft, daß beim Übergang von einer Kombination auf die folgende sich nur eine Binärstelle ändert (Vorteil bei Zähl- und Abtastvorgängen und für das Erreichen hoher Verarbeitungsgeschwindigkeiten, z. B. Gray-Kode) und daß durch Redundanz in der kodierten Zahlendarstellung Übertragungsfehler festgestellt werden können.
Alphanumerische Zeichen und Befehlsdarstellungen. Im Verkehr mit Informationsverarbeitungseinrichtungen ist es notwendig, ganz allgemein alphanumerische Zeichen (Ziffern, Buchstaben, Satz- und Sonderzeichen) und Befehle (Anweisungen für bestimmte Handlungen) binär zu verschlüsseln.
Kodes für alphanumerische Zeichen. Der Fernschreib-Kode CCITT Nr. 2 ist ein international genormter 5-Bit-Kode für die postalische Übertragung alphanumerischer Zeichen. Es existieren weiterhin 7- und 8-Bit-Kodes zur Informationsdarstellung für Digitalrechner auf Loch- oder Magnetbändern.

1 … 5	6	… 16
1	2	3

1 – Operationsteil (z.B. 5 Bit)
2 – Modifizierungsteil (z.B. 1 Bit)
3 – Adressteil (z.B. 10 Bit)

Abb. 14.3.2-3 *Struktur eines Befehlswortes*

Befehlsdarstellung. Zur Abarbeitung eines speziellen Programms in Digitalrechnern müssen im Programmspeicher entsprechende Daten- und Befehlsworte bereitstehen. Die Befehle geben i. allg. in binär-kodierter Form an, welche Operationen mit Datenworten in bestimmten Speicherzellen des Programmspeichers durchzuführen sind. Die Befehlsworte können die Struktur nach Abb. 14.3.2-3 haben. Die Befehlswortlänge stimmt in der Regel mit der Datenwortlänge überein (Unterschiede bestehen dann im Vielfachen einer Einheitswortlänge des betreffenden Digitalrechners).
Im Operationsteil (*1*) werden binär kodiert die ausführbaren Operationen, wie Datentransporte, arithmetische bzw. logische Befehle, Ein- bzw. Ausgabebefehle, Sprungbefehle usw., fixiert. Der Operationsteil wird als „Teilwort" separat entschlüsselt und veranlaßt die entsprechende Aktivierung der speziellen Digitalschaltungen in einem Digitalrechner. Der Operationsumfang (bei 5 Bits eigentlich 32 mögliche Operationen) kann durch Nutzung weiterer oder aller Bits des Befehlswortes bei Vorgabe einer bestimmten Binärkombination im Operationsteil erweitert werden. Im Adressenteil (*3*) wird die Speicherzelle adressiert, in denen das Datenwort steht, das auf der Basis der vorgegebenen Operation verarbeitet werden soll. Um den Umfang des Programmspeichers nicht z. B. auf $2^{10} = 1\,024$ Worte = 1 K Worte zu beschränken, können mit Hilfe der Information im Modifizierungsteil (*2*) sog. Adressenrechnungen durchgeführt werden, die das Ansprechen von Speicherzellen über die Anzahl von z. B. 1 K Worte hinaus gestatten.

14.3.3. Zentraleinheit eines Digitalrechners und periphere Geräte

Unter einem Digitalrechner wird ein Rechenautomat verstanden, bei dem Eingabe, Verarbeitung, Speicherung und Ausgabe der Informationen in digitaler Form erfolgen. Im Gegensatz zum analogen Rechenautomaten (vgl. 14.3.1.) verfügt der Digitalrechner mit dem Rechenwerk über nur

eine einzige Verknüpfungseinrichtung und stellt einen sequentiell arbeitenden Rechenautomaten dar. Anstelle der Nachbildung der Aufgabenstruktur durch ein physikalisches Modell im analogen Rechenautomaten muß beim Digitalrechner die zu lösende Aufgabe, der Lösungsalgorithmus, zur Vorbereitung auf die Abarbeitung in eine logische Ablaufsteuerung umgesetzt werden. Das Ergebnis dieser Umsetzung ist das *Programm*, das die einzelnen vom Digitalrechner auszuführenden Schritte als Befehle enthält. Steuerwerk und Rechenwerk bilden den *Prozessor* (zentrale Verarbeitungseinheit) eines Digitalrechners. Der Prozessor (unter Umständen auch mehrere Prozessoren) bildet mit dem Speicher (Arbeitsspeicher) und den Ein-/Ausgabesteuerwerken (Hilfseinrichtungen zur Ansteuerung der sog. peripheren Geräte) die *Zentraleinheit* des Digitalrechners. Die Zentraleinheit – ein meist funktionell und konstruktiv abgeschlossener Komplex – trägt das Bedienungsfeld des Digitalrechners, sofern dieses nicht auf einem gesonderten anschließbaren Bedienpult angeordnet ist. Zur Kommunikation mit der Umwelt, insbesondere mit dem Bediener, hat der Digitalrechner zahlreiche Ein- und Ausgabegeräte, die zur Peripherie des Digitalrechners zählen. Diese Geräte verkehren i. allg. mit dem Arbeitsspeicher der Zentraleinheit und sind über die Ein-/Ausgabesteuerwerke mit dieser verbunden.

Aufbau und Wirkungsweise der Zentraleinheit. Die Eingabe der Daten und Befehle erfolgt über eine *Eingabeeinheit* wortweise in den Speicher in Form des sog. Rechenprogramms. Die Abarbeitung des Rechenprogramms erfolgt in einer zyklischen Arbeitsweise, indem vom *Steuerwerk* über die Befehle des Programms gesteuert, die eingespeicherten Daten des Rechenprogramms im *Rechenwerk* verknüpft werden und das Ergebnis über die *Ausgabeeinheit* in geeigneter Weise ausgegeben wird.

Beispiel: Das nachfolgende Rechenprogramm ist vorgegeben.

Speicherzelle	Operation	Adresse	Daten
101	EIN	201	
102	ADD	202	
103	MUL	203	
104	AUS	204	
.			
.			
.			
.			
201			+ 77
202			+ 83
203			+ 10
204			

Es ist zu erkennen, daß in den Zellen 101 bis 104 des Speichers die Befehle (mit Operations- und Adressenteil) und in den Zellen 201 bis 203 die Daten (vorzeichenbehaftete Zahlen) abgespeichert sind. Die Operationen EIN, ADD, MUL, AUS sollen in gleicher Reihenfolge folgende Bedeutung haben: Eingabe ins Rechenwerk, Addieren zur Zahl im Rechenwerk, Multiplizieren mit Zahl im Rechenwerk, Ausgabe vom Rechenwerk.

Es ist zu beachten, daß in den einzelnen Speicherzellen nur binäre Signale stehen. Aus Gründen der Einfachheit werden die Erläuterungen in der uns gewohnten Umgangssprache durchgeführt (Dezimalsystem, Alphabet). Der Ablauf des Programms wird in Abb. 14.3.3-1 verdeutlicht.

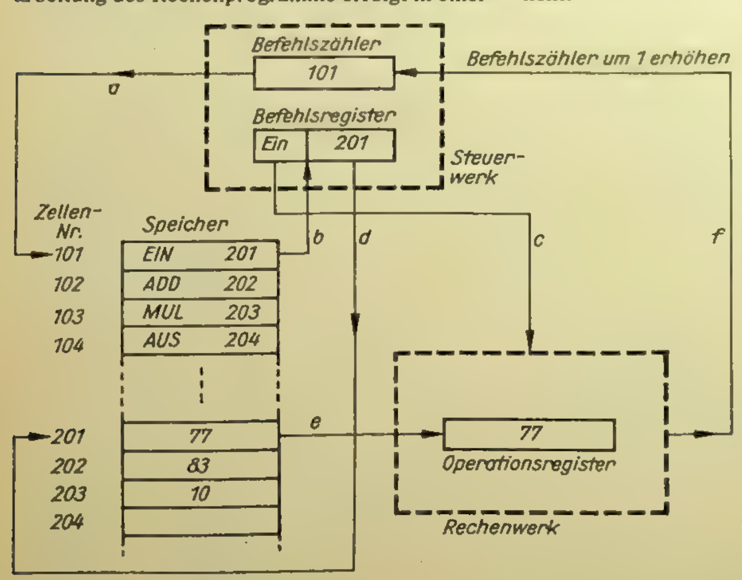


Abb. 14.3.3-1 Befehlsablauf

Das Steuerwerk hat einen Befehlszähler. Durch Wirkung eines Startsignals besitzt der Befehlszähler den Inhalt 101 und adressiert die Speicherzelle 101 (Weg *a*). Der Inhalt dieser Speicherzelle (Befehl) wird in ein Wertregister (*Befehlsregister*) übertragen bzw. eingeschrieben (Weg *b*) und mit einer Auswerteinrichtung (sog. *Dekoder*) als Operationsteil und Speicherzellenadresse für ein Datenwort gedeutet. Der Operationsteil bereitet das Rechenwerk (Weg *c*) auf die Operation (z. B. Eingabe ins Operationsregister) vor. Um diese Operation auszuführen, wird über den Weg *d* der Adressenteil des Befehlswortes zur Adressierung der Speicherzelle 201 (Datenspeicherzelle) benutzt. Der Inhalt der Speicherzelle 201 wird dann vom Rechenwerk übernommen (Weg *e*). Der Eingabebefehl EIN ist ausgeführt, im *Operationsregister* (*Akkumulator*) des Rechenwerks steht die Zahl 77. Nach Abschluß dieses Befehlsablaufs, ausgelöst durch den Inhalt der Speicherzelle 101, gibt das Rechenwerk an das Steuerwerk eine Fertigmeldung (Weg *f*). Diese veranlaßt die Erhöhung des Befehlszählers um 1 auf 102. Dann beginnt der eben beschriebene Vorgang ab Zelle 102. Zu der Zahl 77 wird die Zahl 83 addiert. Im nächsten Befehlsablauf (Befehlszyklus) wird das Ergebnis noch mit 10 multipliziert, und im letzten Befehlszyklus erfolgt die Ausgabe des Ergebnisses nach Zelle 204. Aus der Beschreibung der Befehlszyklen ist die notwendige Funktionsweise der digitalen Funktionsglieder zu erkennen.

Adressierbare Speicher. Durch eine Adressierung mittels Binärworten müssen die Inhalte der adressierten Speicherzellen (ebenfalls in Binärwortdarstellung vorliegend) ausgelesen bzw. auch eingeschrieben werden können. Diese Speicher werden deshalb auch *adressierbare Lese-/Schreibspeicher* genannt. Sie bestimmen bezüglich Umfang und Ökonomie den Stand der Datenverarbeitungstechnik.

Die Technologie zur Herstellung von Halbleiterspeicheranordnungen hat in den letzten Jahren im Vergleich zu anderen Techniken wohl die größten Fortschritte gemacht.

Diese Entwicklung war notwendig, da für die moderne Informationsverarbeitungstechnik das Vorhandensein eines effektiven „Gedächtnisses", eines Speichers, den Stand dieser Technik bestimmt. Kennzeichnende technische Daten für Speicher sind:

– die Speicherkapazität,
– die sog. Zugriffszeit zu den Informationen,
– das Volumen der Speicheranordnungen.

Bei den heutigen beherrschbaren Technologien ist die Halbleitertechnologie die geeignetste zur Herstellung dieser Speicher. Die Strukturen der Speicher sind dadurch gekennzeichnet, daß sie aus tausendfachen Wiederholelementen bestehen, den Speicherelementen für 1 Bit. Aus Abb. 14.3.3-1 ist ersichtlich, daß zur Einhaltung des sich immer wiederholenden Befehlsablaufs, der im Prinzip typisch für alle Rechner ist, die

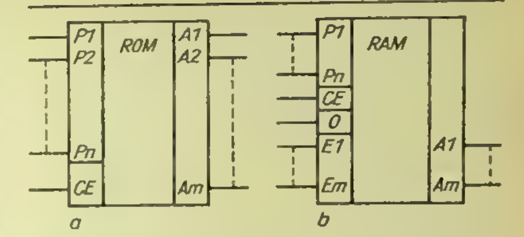


Abb. 14.3.3-2 a Symbolik des Funktionsglieds ROM und b RAM

Informationen (Daten- und Befehlsworte) zeitseriell durch die sog. Adressierung aufgerufen werden. Deshalb sind die kennzeichnenden Ein- und Ausgänge der adressierbaren Speicher i. allg.:

– Adresseneingänge,
– Informationsausgänge (Anzahl meist identisch mit der Bitanzahl des Informationswortes),
– Informationseingänge (zur Eingabe von Informationen auf adressierte Speicherplätze),
– Steuereingänge (z. B. für die Operationen „Auslesen", „Einschreiben"),
– Systemeingänge (z. B. zur Aneinanderreihung von Speicheransteuerungen zwecks Kapazitätserhöhung).

Festwertspeicher werden eingesetzt, wenn unveränderliche Parameter, Werte, Konstanten usw. abrufbar zu speichern sind. Sie haben die Eigenschaft, daß ihre eingespeicherten Informationen nur gelesen werden können. Diese Funktionsglieder werden deshalb auch *ROM* (*Read Only Memory*, „Nur-Lese-Speicher") genannt. Die entsprechende symbolische Darstellung zeigt Abb. 14.3.3-2a. Danach benötigen derartige Funktionsglieder die Adresseneingänge *P*1 bis *Pn* zur Adressierung der einzelnen Binärworte *A*1 bis *Am*. Die Binärwortlänge beträgt je nach ROM-Typ 1, 2, 4, 5 oder 8 Bits und das Adressenwort 6 bis 12 Bits. Die Binärwortlänge und die Speicherkapazität kann durch Parallelschaltung von ROM-Funktionsgliedern in den systemtechnisch vorgegebenen Grenzen erweitert werden. Der Eingang *CE* (chip enabel) dient dabei der Adressenerweiterung.

Bei der Adressenerweiterung werden die CE-Eingänge in der Weise zusammengeschaltet, daß durch Zusatz-Bits der Adressierung jeweils ein Eingang CE angesteuert wird. Die Informationsausgänge *A*1 bis *Am* werden parallel geschaltet. Bei der Wortlängenerweiterung werden die Adresseneingänge parallel geschaltet.

Die ROM-Funktionsglieder werden z. B. für die Realisierung folgender Funktionen eingesetzt:

– in Zeichengeneratoren zur adressierbaren Speicherung von Ziffern und Buchstaben. Zur Darstellung von 64 verschiedenen alphanumerischen Zeichen (6 Bits Adresse) in einem

(5 × 7)-Punkte-Raster werden 2 240 Bits benötigt;
— zur Speicherung trigonometischer Funktionen. Die Adresse gibt den Winkel und das Ausgangsbinärwort (z. B. 8 Bits), den Funktionswert, an (Anwendung bei Taschenrechnern);
— zur Speicherung des Jahreskalenders bei Quarzuhren;
— als Mikroprogrammspeicher in Digitalrechnern.

Lese-Schreib-Speicher. Besteht das Problem bei der Informationsverarbeitung darin, während der Befehlsabläufe (vgl. Abb. 14.3.3-1) errechnete Informationen abzuspeichern, dann muß eine Speichereinrichtung nach Abb. 14.3.3-2b eingesetzt werden, deren auf eine bestimmte Adresse *P*1 bis *Pn*, *CE* abgespeicherte Binärworte *A*1 bis *Am* ausgelesen oder über die Eingänge *E*1 bis *Em* neu eingeschrieben werden können. Die entsprechende Operation muß durch den Zustand des Binärsignals 0 vorgegeben werden. Zur Systemerweiterung ist wiederum der Eingang *CE* vorgesehen. Im Gegensatz zu Speichereinrichtungen mit sequentiell orientiertem Zugriff (z. B. Magnetband) werden oben beschriebene Funktionsglieder als Speicher mit wahlfreiem (direktem) Zugriff (*R*andom *A*ccess *M*emory, *RAM*) bezeichnet.

Register. Diese Funktionsglieder werden als schnelle Hilfsspeicher für die Zwischenspeicherung von Binärworten genutzt (z. B. Befehlsregister zur Zwischenspeicherung von Befehlsworten, Operationsregister, Akkumulator zur Zwischenspeicherung von Datenworten, Befehlszähler zur Zwischenspeicherung von Adreßworten).

Rechenwerk. Das Kernstück eines Rechenwerks ist das arithmetische und logische Operationswerk. Es besteht aus dem Addierwerk und einer Reihe von Registern. Die Hauptregister enthalten zum Beginn einer Operation die zu verknüpfenden Operanden. Sie sind i. allg. nicht adressierbar, sondern werden durch den Operationsteil der Befehle unmittelbar angesprochen. Neben weiteren Registern enthält das Rechenwerk mehrere 1-Bit-Register, z. B. zur Aufnahme von Überträgen und Überläufen aus Rechenoperationen. Von den Signalen dieser Register werden Entscheidungen für die Operations- und Programmsteuerung abgeleitet. Der adressierbare Speicher versorgt das Rechenwerk mit Daten, das Steuerwerk überwacht und steuert den Arbeitsprozeß. Die durchzuführenden Operationen sind neben den eigentlichen Rechenoperationen auch Boolesche Verknüpfungen, Verschiebungen, Vergleiche u. a. Struktur und Aufwand des Rechenwerks werden jedoch von den Arithmetikoperationen bestimmt (z. B. Wortlänge). Die Geschwindigkeit der Verarbeitung wird i. allg. so gewählt, daß das Rechenwerk einfache Operationen schritthaltend mit der Geschwindigkeit des Speichers ausführen kann.

Mikroprozessoren. Die Fortschritte auf dem Gebiet der modernen Digitalrechnertechnik werden durch die Entwicklungen auf dem Gebiet der Prozessoren bestimmt. Wenn diese in Form von integrierten Schaltkreisen realisiert werden, spricht man von *Mikroprozessoren.*

Die Integration von adressierbaren Speichereinrichtungen hoher Komplexität waren bisher ein Maß des Standes der Bauelementetechnologie. Diese Technologie ist durch ein weiteres technisches Novum revolutioniert worden. Ende der 60er Jahre ist die Integration von Mikroprozessoren gelungen. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß große Komplexe von digitalen Schaltungen mit unregelmäßiger Struktur auf einem Chip bzw. in einem Gehäuse realisiert wurden. Der Mikroprozessor, Abk. MP, realisiert dabei die

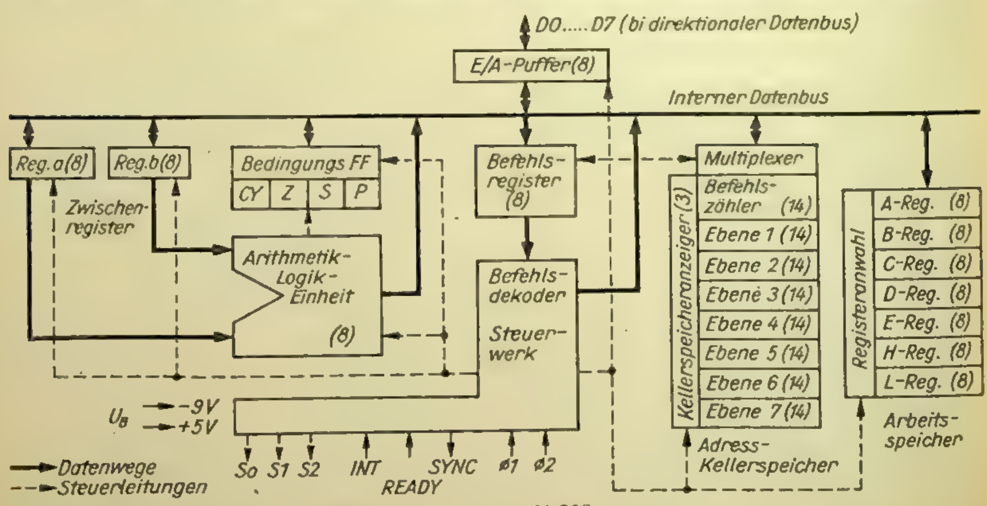


Abb. 14.3.3-3 Blockschaltbild des Mikroprozessors U 808

Funktionen des Steuer- und Rechenwerks. Die Wege eines typischen Befehlszyklus (vgl. Abb. 14.3.3-1) werden im Mikroprozessor geschaltet. Die ersten Funktionsglieder sind in *p*-Kanal-MOS-Technik (vgl. 11.5.4.) realisiert und benötigten eine Befehlszykluszeit (Befehlsablaufzeit) für eine Addition von 8 Bit-Worten von $\approx 20\ \mu s$.

Anhand eines Blockschaltbilds (Abb. 14.3.3-3) sollen grundsätzliche Begriffe der Mikroprozessortechnik (MP-Technik) erläutert werden. Durch die beschränkte Anzahl der Anschlüsse des Schaltkreises eines Mikroprozessors muß mit Mehrfachausnutzung der Ein- und Ausgänge sowie zeitseriell, speziell bei der Ein-/Ausgabe der Daten und Befehle, gearbeitet werden. Eine Geschwindigkeitssteigerung der Arbeitsweise eines MP wird also nicht nur durch die Technologie der Schaltungstechnik, sondern auch durch die der Gehäuse bestimmt (z. B. U 808 18 bzw. 24 Anschlüsse; Weiterentwicklungen 40 Anschlüsse). Die 4 Grundfunktionsblöcke des MP sind über einen 8-Bit-Datenbus verbunden:

– Befehlsregister und Steuerwerk,
– (dynamische) Speichereinrichtungen,
– Arithmetik- und Logikeinheit,
– Ein-/Ausgabe-Puffer (Verstärker).

Der Datenaustausch mit externen Funktionsgliedern kann über Daten- und Adressenkanal erfolgen, der Informationsverkehr in beiden Richtungen zuläßt (auch *bidirektionaler Datenverkehr* genannt). Jeder Befehl gelangt ins Befehlsregister. Anschließend führt das Steuerwerk die Dekodierung durch. Mit den Taktsignalen Ø1, Ø2 (Zeitraster für den internen Ablauf) und den Steuersignalen INT und READY erfolgt die Steuerung der internen Abläufe. Das Steuerwerk liefert weiterhin die Steuersignale *S*0, *S*1, *S*2 und SYNC zur Steuerung externer Funktionsglieder (wie Datenwege, Speichereinrichtungen, Ein-/Ausgabe) sowie während einer definierten Zeitstufe im internen Ablauf die Datensignale *D*6 und *D*7.

Dynamische Speichereinrichtungen. Der Adressenstapel (sog. *Kellerspeicher*) besteht aus 8 14-Bit-Registern. Ein Register wird als Befehlszähler genutzt. Die übrigen 7 14-Bit-Register dienen zur Speicherung der Rückkehradressen bei der Realisierung von Unterprogrammansprüngen. Ein 3-Bit-Kellerspeicheranzeiger (Stack-pointer) speichert die aktuelle Befehlszähler-Adresse innerhalb des Stapels. Der 14-Bit-Befehlszähler erlaubt die direkte Adressierung eines 16 K-Byte-Speichers (1 K = 1024, 1 Byte = 8 Bit).

Interner Arbeitsspeicher. Neben dem Akkumulator *A* (Operations- und Ergebnisregister der Arithmetik-Logik-Einheit) besitzt der interne Arbeitsspeicher 6 Zusatzregister (B, C, D, E, H, L). Bei allen arithmetischen Operationen steht der erste Operand und nach der Befehlsausführung das Ergebnis im Akkumulator *A*.

Alle Register sind unabhängig und können als Zwischenspeicher dienen. Erfolgt eine Operation mit einer Speicherzelle einer externen Speichereinrichtung (Hauptspeicher), so müssen die Register H und L die Speicheradresse enthalten (L [Low] = niederwertiger Adressenteil, H [High] = höherwertiger Adressenteil).

Arithmetik- und Logikeinheit. Alle arithmetischen und logischen Operationen führt ein 8-Bit-Binärrechenwerk mit Übertragsbildung aus.

Zur Speicherung der Operanden dienen 2 nicht adressierbare Register *a* und *b*. Die 4 Bedingungs-Flip-Flops (FF) (Flag-Bits) werden nach der Operation entsprechend gesetzt. Es bedeuten:

CY (Carry) – Übertrags-FF (L bei Übertrag)
Z (Zero) – Null-FF (L bei Ergebnis 0)
S (Sign) – Vorzeichen-FF
P (Parity) – Paritäts-FF (L bei gerader Anzahl von L-Bits)

Bedingte Operationen (z. B. bedingte Sprünge) werden in Abhängigkeit vom Zustand dieser Bedingungs-Flip-Flops ausgeführt.

Ein-/Ausgabe-Puffer. Der 8-Bit-E/A-Puffer ist für Daten- und Adreßsignale die einzige Verbindung zu externen Funktionsgliedern. Aus diesem Grund wird z. B. die 14-Bit-Speicheradresse in bestimmten Zeitstufen zeitmultiplex durch 2 8-Bit-Worte übertragen.

Ablaufsteuerung und Taktung des Mikroprozessors U 808. Aus Abb. 14.3.3-3 ist ersichtlich, daß die Funktionsblöcke durch Datenwege und Steuerleitungen miteinander gekoppelt sind. Die Signale auf den Steuerleitungen erscheinen in einer bestimmten, von der Art des Befehls abhängenden zeitlichen Folge. Zum Aufbau der zeitlichen Folge von Signalen müssen dem MP 2 sich nicht überlappende, aber voneinander abhängige Impulsfolgen Ø1 und Ø2 zugeführt werden, die eine Zykluszeit (Wiederholzeit) T_{ZY} von $\geqq 2\mu s$ besitzen.

Ein Befehlsablauf besteht aus einer Folge von Zeitstufen, wobei jede Zeitstufe 2 Zykluszeiten T_{ZY} benötigt. Intern arbeitet der MP mit 5 unterschiedlichen Zeitstufen (*T*1 bis *T*5). Durch die Signale *S*0, *S*1, *S*2 wird die jeweilige Zeitstufe bzw. ihre mögliche Modifikation angezeigt.

Ein Maschinenzyklus besteht im einfachsten Fall aus den Zeitstufen *T*1 bis *T*5. Der Befehlsablauf erfordert je nach Befehlsart 1, 2 oder 3 Maschinenzyklen, wobei einige Zeitstufen übersprungen werden können.

Weiterentwicklung der Mikroprozessortechnik. Der beschriebene Mikroprozessor in *p*-Kanal-MOS-Technik erfüllt insbesondere aus der Sicht der Verarbeitungsgeschwindigkeit keinesfalls die Anforderungen universeller Digitalrechner, deshalb sind und werden Weiterentwicklungen auf

diesem Gebiet kennzeichnend für zukünftige Datenverarbeitungstechniken sein. Die Weiterentwicklung wird bestimmt durch:
– den Einsatz neuer Halbleitertechnologien. Ein Mikroprozessor in n-Kanal-MOS-Technik (z. B. MP 8080 von INTEL, Z 80 von Zilog) benötigt nur noch ≈ 1,5 bis 2 µs Befehlszykluszeit. Die moderneren Bauelementetechnologien, wie Schottky-TTL, I^2L, können die Befehlszykluszeiten auf 50 bis 300 ns senken;
– die Erhöhung der Stiftzahlen der Gehäuse integrierter Schaltkreise. Der 8-Bit-E/A-Puffer für den Transport der Daten- und Adreßsignale stellt einen Engpaß für die Informationsverarbeitung dar. Die technologische Möglichkeit der Erhöhung der Stiftzahlen pro Gehäuse wurde u. a. für die Trennung des Adreßbusses (16 Bit für 64 K Speicherplätze) vom Datenbus ausgenutzt. Es entsteht ein wesentlich effektiverer Befehlsaufbau und eine günstigere Befehlsabarbeitung bei gleichzeitiger Reduktion externer Schaltungstechnik;
– die Erhöhung der Befehlsanzahl. Die möglichen auszuführenden Befehle wurden durch die Weiterentwicklung von ≈ 50 (U 808), auf ≈ 80 (MP 8080) bzw. 160 (MP Z 80) erhöht. Damit wird eine effektivere Programmgestaltung ermöglicht;
– die Erhöhung der Integration und Verbesserung der Systemtechnik. Die hohe Beherrschung der Bauelementetechnologie gestattete es, eine weitere Reduktion der externen Schaltungstechnik dadurch zu erreichen, daß nur eine Betriebsspannung (+5 V) und nur ein TTL-Phasentakt benötigt wird.

Weiterhin werden Nebenfunktionen zur Systemsteuerung, Interruptsteuerung, Steuerung von dynamischen Lese-Schreib-Speichern und zur Prioritätserkennung in den Mikroprozessor integriert. Durch all die genannten Eigenschaften zeichnet sich z. B. der MP Z 80 gegenüber dem MP 8080 aus. Dadurch kann u. a. ein fünffach schnellerer Datendurchsatz und eine Speicherplatzeinsparung von ≈ 50 % erreicht werden. Die zukünftige Entwicklung zeichnet sich in der Weise ab, daß in den Mikroprozessor in zunehmendem Maße Speichereinheiten einbezogen werden.

Befehlssatz. Dem Digitalrechner wird eine Folge von Befehlen eingegeben, die als *Programm* bezeichnet werden. Das Ergebnis des Programmierens wird *Software* genannt, im Gegensatz zu Bausteinen und Gerätebestandteilen des Digitalrechners, die als *Hardware* bezeichnet werden. Bei der Entwicklung eines Digitalrechners wird seine Zentraleinheit, insbesondere sein Prozessor, mit der Fähigkeit ausgestattet, eine bestimmte Gruppe von Operationen durchzuführen. Sie wird hierzu so gestaltet, daß sich als Folge der Dekodierung eines bestimmten Befehls (vgl. 14.3.2.) durch ihre Steuerlogik ein ganz spezieller Funktionsablauf ergibt. Folglich stellt die Gesamtheit der Befehle, die von einer Zentraleinheit ausgeführt werden können, den *Befehlssatz* des Prozessors dar. Mit jedem Befehl kann der Programmierer eine bestimmte Operation veranlassen, wie arithmetische und logische Operationen, Registerbefehle (z. B. die Erhöhung eines Registerinhaltes um 1), Befehle zur Übertragung von Daten zwischen Registern, zwischen einem Register und einem adressierbaren Speicher oder zwischen einem Register und peripheren Geräten zur Ein- und Ausgabe von Daten. In den meisten Befehlssätzen sind auch bedingte Anweisungen vorgesehen. Ein solcher *bedingter Befehl* besagt, daß eine bestimmte Operation nur dann ausgeführt werden soll, wenn spezifizierte Bedingungen erfüllt sind, z. B. „springe, wenn das Ergebnis der letzten Operation Null war". Durch bedingte Befehle erhält ein Programm die Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen. Die spezifizierten Bedingungen werden aus den Zuständen der Bedingungs-Flip-Flops abgeleitet.

Adressierungsarten. Oft befinden sich die Daten, mit denen eine Operation ausgeführt werden soll, in einem adressierbaren Speicher. Ein Digitalrechner ist u. a. um so effektiver, je mehr Speicherzellen er ansprechen (adressieren) kann. Auf der anderen Seite soll das Befehlswort, welches auch die Adresse der zu verarbeitenden Daten angibt, aus ökonomischen Gründen wenige Bits enthalten. Deshalb sind unterschiedliche Adressierungsarten entwickelt worden.

Bei der *direkten Adressierung* enthält der Befehl, in der Regel ein Mehrwortbefehl, die genaue Speicheradresse der Dateneinheit. Bei der *indirekten Adressierung* gibt der Befehl ein Register an, das die Speicheradresse beinhaltet, und bei der *unmittelbaren Adressierung* beinhaltet der Befehl selbst die Daten (Mehrwort-Befehl).

Mit Ausnahme von Unterbrechungs- und Verzweigungsoperationen erfolgt die Ausführung der Befehle über aufeinanderfolgende adressierbare Speicherplätze.

Interface. Die Normung bzw. Standardisierung der Schnittstellen in Informationsverarbeitungssystemen betrifft logische, elektrische und konstruktive Bedingungen zur Sicherstellung der universellen Zusammenschaltbarkeit und des Zusammenwirkens von Teilen eines Systems. Das betrifft z. B. die Zusammenschaltung der Zentraleinheit eines Digitalrechners mit peripheren Geräten. Ein sog. *Standard-Interface* (*SI*), auch *Anschlußbild*, *Nahtstelle* genannt, ist für festgelegte Daten zu den genannten Bedingungen definiert. Diese Daten können sich auf Signalpegel, Signalkodierung, Übertragungsverkehr (Einweg- oder Zweiwegverkehr), Zeitraster (synchron oder asynchron zu einem Normzeitgeber), Zeitfestlegungen und -folgen (Status-Diagramm) und Anzahl der BUS-Leitungen (Daten-, Adressen-, Steuerleitungen) beziehen.

Bisherige Standard-Interface-Festlegungen sind anwendungsspezifisch getroffen worden und stellen wie bei allen Festlegungen zu technischen Systemen technisch-ökonomische Kompromisse dar. Das *Standard-Interface SI 2.2* realisiert den Datenaustausch zwischen einer Zentrale und den an diese angeschlossenen Funktionseinheiten. Der Datenaustausch wird durch bedingungsabhängig wirkende Signale gesteuert. Das *CAMAC-System* (von engl. computer application to measurement and control, Rechneranwendung zur Messung und Kontrolle) ist als universelles Zweiweg-Interface-System zwischen beliebigen Prozessen und beliebigen Digitalrechnern gedacht. Der *IEC-BUS* (erarbeitet in einer Arbeitsgruppe des Technical Commitees 66 der Internationalen Elektrotechnischen Commission) stellt eine Schnittstellennormung für die beliebige Zusammenschaltung programmierbarer Meßgeräte dar.

Periphere Geräte. Während bei der Realisierung der Zentraleinheit von Digitalrechnern im Zuge der technischen Entwicklung im zunehmenden Maße hochintegrierte mikroelektronische Schaltkreise eingesetzt wurden und damit das Volumen und die Kosten der Zentraleinheit enorm gesunken sind, hat der Anteil der an die Zentraleinheit angeschlossenen peripheren Geräte – bezogen auf Anschaffungswert und Grundfläche – ständig zugenommen. Die peripheren Geräte werden nach der Art der Informationswandlung und nach ihrer Beziehung zur Zentraleinheit des Digitalrechners (Staffelung der Peripherie) klassifiziert.

Externe Speicher sind Speicher-, Ein- und Ausgabegeräte für Daten, die extern, also außerhalb der Zentraleinheit, in maschinenkodierter Form gespeichert werden und damit die Speicherkapazität der Zentraleinheit erweitern bzw. die Daten z. T. extrem schnell übertragen. Dazu zählen z. B. Lochkarten- und Lochbandeinrichtungen, Leser und Stanzer, Magnetbandspeicher, magnetomotorische Großraumspeicher.

Ein- und Ausgabegeräte ermöglichen die wechselseitige Verbindung Mensch–Zentraleinheit bei gegenüber externen Speichern niedriger Geschwindigkeit (z. B. Tastaturen, Drucker, Geräte zur Klarschrifterkennung sowie zur phonetischen und grafischen Ein- und Ausgabe).

Spezielle Anschlußgeräte sind Wandler und Systeme, die die Zentraleinheit mit einem beliebigen funktionell übergeordneten System (z. B. zur Steuerung oder Regelung von Massen-, Energie- und Verkehrströmen) verbinden (z. B. Datenfernübertragungsgeräte, Digital-Analog- und Analog-Digital-Umsetzer, Uhren u. a. Zeitgeber, Meß-, Anzeige- und Stellglieder).

Alle Geräte der *ersten Peripherie* sind mit der Zentraleinheit elektrisch durch Datenkanäle verbunden, in denen die Daten zeichen-, wort- oder blockweise übertragen werden. Da Zentraleinheit und Peripheriegerät meist sehr verschieden schnell arbeiten, macht sich vor dem Transport eines Zeichens, Worts oder Blocks in den Datenkanälen oft eine kurzzeitige Zwischenspeicherung durch *Pufferspeicher* erforderlich. Die Zentraleinheit moderner Digitalrechner verfügt stets über mehrere Ein- und Ausgabekanäle, in denen die Daten auch zeitgeschachtelt übertragen werden können (*Simultan-* oder *Multiplexkanal*). Es lassen sich so zahlreiche und auch unterschiedliche, rein äußerlich gleichzeitig arbeitende periphere Geräte anschließen, sofern deren Signale den Datenkanälen angepaßt sind. Ein Standard-Interface sichert die Anschlußkompatibilität. Dieses Interface wird in der modernen Datenverarbeitungstechnik durch integrierte Schaltkreise realisiert. Um den Datentransport von externen Speichern in Ausgabekanäle und umgekehrt die Übernahme von Eingabedaten in den Speicher wesentlich zu beschleunigen, realisiert ein sog. *DMA-Schaltkreis* (von engl. direct memory access) den direkten Speicherzugriff, ohne die Arithmetik/Logikeinheit in Anspruch zu nehmen. Während des direkten Datentransports befindet sich der Prozessor im Wartezustand. Der DMA-Schaltkreis kann u. a. die Steuerung für 4 Ein-/Ausgabekanäle mit Blocklängenzähler, Speicheradressenanzeiger und Kaskadenpriorität enthalten. Der Übergang von der parallelen Wortdarstellung im Prozessor zur seriellen synchronen oder asynchronen Datenübertragung auf Leitungen wird mit *USART-Schaltkreisen* (von engl. universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter) realisiert. Sie stellen das Bindeglied zwischen einem z. B. 8-Bit-Datenbus und der zweiadrigen Übertragungsleitung dar. Da diese Schaltkreise programmierbar sind, lassen sie sich an unterschiedliche periphere Geräte leicht anpassen. Dieser Schaltkreis, auch *SIO-Schaltkreis* (von engl. serial input/output) genannt, gestattet z. B. den unmittelbaren Anschluß von Bildschirmgeräten, Fernschreibern und den modernen Floppy-Disk-Speichergeräten. Der häufigste Übergang vom Prozessor in die Peripherie vollzieht sich bei der speziellen Gerätetechnik in der parallelen Datendarstellung. *Programmierbare Peripherie-Interface-Schaltkreise* (*PPI*) gestatten es, die Funktion ihrer Anschlußstifte durch das Mikroprozessorprogramm festzulegen. Ein solcher Schaltkreis, auch *PIO-Schaltkreis* (von engl. parallel input/output) genannt, enthält z. B. 2 8-Bit-Tore, die bidirektional arbeiten und auf die Betriebsarten Byte-Ein- oder -Ausgabe bzw. Bit-Ein- oder -Ausgabe programmiert werden können. Die Schaltungstechnik für Quittierungsbetrieb („handshaking") ist integriert und zugleich ist eine programmierbare Interruptbearbeitung entsprechend den Zustandsbedingungen des peripheren Geräts möglich. Zu den Geräten der ersten Peripherie zählen u. a.

Lochkartenlese- und -stanzeinheiten, Lochbandlese- und -stanzeinheiten, Schnelldrucker (vgl. 17.3.3.), Schreibmaschinen, Kurvenzeichner, Bildschirmeinheiten, Prozeßeingabe- und -ausgabeeinheiten, externe Speicher sowie Datenfernübertragungseinrichtungen.
Zur *zweiten Peripherie* gehören die technisch unabhängig von dem Digitalrechner betriebenen Geräte zur Herstellung und Aufbereitung maschinell lesbarer Datenträger. Darunter fallen Magnetlocher, Kartendoppler, Buchungs- und Fakturiermaschinen mit Lochkarten bzw. Lochbandausgabe, Schreibmaschinen mit Lochbandstanzer und Datenerfassungsgeräte mit Magnetbandaufzeichnung, z. B. spezielle Registrierkassen (vgl. 12.2.1.). Außerdem zählen zur zweiten Peripherie Sortiergeräte, Kodeumsetzer und Geräte zur Umsetzung von Daten von einer Datenträgerart auf eine andere (*Konverter*). Die Geräte der zweiten Peripherie sind nicht direkt über die Ein-/Ausgabekanäle mit der Zentraleinheit verbunden.
Die Geräte der *dritten Peripherie* sind Hilfsmittel und -geräte, wie Aufbewahrungseinrichtungen für Datenträger, Notstromaggregate, Lochbandspulvorrichtungen u. a., die zum Betrieb des Digitalrechners nicht unmittelbar notwendig sind, aber die Arbeit im Zusammenhang mit dem Digitalrechner erleichtern.
Die Klassifizierung der peripheren Geräte nach ihrer Beziehung zur Zentraleinheit, insbesondere bezüglich der Datenein- und -ausgabe, wird häufig auch durch die Begriffe *On-line-* bzw. *Off-line-Betrieb* beschrieben. Ein peripheres Gerät arbeitet dann on-line (oder im On-line-Betrieb), wenn es steuerungs- oder/und übertragungsmäßig mit der Zentraleinheit direkt gekoppelt ist, insbesondere wenn die Informationsübertragung ohne Zwischenschaltung körperlicher Datenträger erfolgt, z. B. über Leitungen oder drahtlos. Arbeitet dagegen jeder Systemteil unabhängig vom anderen ohne Kopplung, oder erfolgt der Transport der Daten oder Datenträger ganz oder teilweise körperlich, insbesondere durch den Menschen als Bindeglied, so verläuft die Arbeit off-line (oder im Off-line-Betrieb).

14.3.4. Programmierung von Digitalrechnern

Beim Programmieren von Digitalrechnern ist Voraussetzung, daß das Lösungsverfahren für ein Problem und damit der Algorithmus festliegt. Aufgabe des Programmierens ist es, hieraus eine Folge von eindeutigen Anweisungen an den Digitalrechner abzuleiten, d. h. ein Programm zu erstellen, das eine durch den Rechner vorgeschriebene Folge von Befehls- und Datenworten in einen Speicher ablegt. Diese Folge wird zur Realisierung des Algorithmus im Digitalrechner genutzt, um die generellen Arbeitszyklen (vgl. 14.3.3.) problemspezifisch wiederholend zu durchlaufen.
Programmieren in Maschinensprache. Die einzelnen Befehle und Daten des Programms werden in der internen Kodierung des angewendeten Digitalrechners vom Programmierer notiert. Dies ist sehr mühevoll und äußerst fehleranfällig.
Programmieren in maschinenorientierter Programmiersprache (*Assemblersprache*). Der Algorithmus muß ebenfalls in eine genaue Befehlsfolge zerlegt werden, jedoch werden für Befehle und Adressen der Speicherzellen anstelle der internen Kodierung symbolische Bezeichnungen verwendet, z. B. für die Befehle verschlüsselte Merkworte (Mnemoniks), die wesentlich leichter erlernbar sind. Mit Hilfe von Makrobefehlen können ganze Befehlsfolgen ersetzt werden, wodurch das Programmieren erleichtert wird. Die Fehleranfälligkeit ist aber auch hier noch relativ groß. Die Programme in der maschinenorientierten Programmiersprache müssen vor ihrer Abarbeitung durch einen sog. *Assembler* in die Maschinensprache übersetzt werden.
Programmieren in problemorientierten Sprachen. Hier kann das Programm weitgehend unabhängig von einem speziellen Digitalrechner beschrieben werden. Bei der Ausarbeitung eines Programms sind im wesentlichen folgende Arbeitsgänge erforderlich:

1. detaillierte Erarbeitung des Algorithmus,
2. Erarbeitung eines Programmablaufplans,
3. Kodierung des Programmablaufplans entsprechend den Möglichkeiten der verwendeten problemorientierten Sprache,
4. Ablochen des Programms (i. allg. auf Lochkarte oder -band),
5. Übersetzen und Laden des Programms,
6. Testen des Programms unter Benutzung von vorbereiteten Testbeispielen (Programmtest),
7. Erarbeitung von Bedienungsvorschrift und Programmbeschreibung.

Beim *automatischen* oder *maschinellen* Programmieren werden bestimmte Arbeiten, die während der Programmvorbereitung für Digitalrechner anfallen, auf dem Rechner selbst durchgeführt. Dazu gehören insbesondere das Übersetzen von Programmen, das Zusammenfügen von Programmen mit Unterprogrammen beim Laden sowie die Testung unter Nutzung von Testhilfen.
Entsprechend den komplizierteren Sprachelementen problemorientierter Sprachen ist der Übersetzungsvorgang wesentlich aufwendiger als bei maschinenorientierten Sprachen. Das notwendige Übersetzungsprogramm wird *Compiler* genannt. Der Compiler analysiert ein vorliegendes Programmelement und erzeugt dann die entsprechenden Maschinenbefehle. Dabei werden auch die symbolischen Adressen in echte Speicheradressen umgewandelt.

Problemorientierte Programmiersprachen sind dem menschlichen Ausdrucksvermögen weit besser angepaßt als maschinenorientierte. Erstere sind außerdem auf die Formulierung von Programmen für die Lösung von Problemen einer bestimmten Klasse zugeschnitten. So enthalten die problemorientierten Sprachen ALGOL (von engl. *al*gorithmic *l*anguage) und FORTRAN (von engl. *for*mula *tran*slation) genau die Sprachelemente, die für die Formulierung von Programmen für mathematische Aufgaben benötigt werden. Die problemorientierte Sprache COBOL (von engl. *co*mmon *b*usiness *o*riented *l*anguage) ist speziell ausgelegt für die Formulierung ökonomischer Datenverarbeitungsaufgaben. Die problemorientierte Sprache *PL/I* (von engl. *p*rogramming *l*anguage) ist für die Lösung wissenschaftlich-technischer und ökonomischer Aufgaben gleichermaßen geeignet. PL/I geht beträchtlich über die aufgeführten problemorientierten Sprachen hinaus, insbesondere lassen sich die Möglichkeiten moderner Digitalrechner besser ausnutzen.

Zur weiteren Rationalisierung der Programmierarbeit dienen heute *Programmbibliotheken*, die meist vom Hersteller eines Digitalrechners eröffnet und über ihn oder einer Nutzergemeinschaft mehrerer Rechenzentren laufend durch neue Programme (niedergelegt in Dokumentationen sowie auf anwendungsbereiten Datenträgern) erweitert werden. Jede Programmbibliothek enthält Arbeits- und Unterprogramme mit variablen Parametern, aus denen die spezifischen Arbeitsprogramme mit minimalem Aufwand ableitbar sind. In modernen elektronischen Datenverarbeitungsanlagen steht ein großer Teil der Programmbibliothek auf externen Speichern, z. B. Magnetplattenspeichern, abrufbereit zur Verfügung; zentrale Änderungsdienste sorgen regelmäßig für aktuellen Bestand.

14.3.5. Datenverarbeitung

Unter Datenverarbeitung im weiteren Sinne wird das meist massenhafte Erfassen, Aufbereiten, Speichern, Bearbeiten und Ausgeben von Daten verstanden. Im engeren Sinne bezeichnet sie den in einem Digitalrechner ablaufenden Prozeß, bei dem die Eingangswerte sowohl numerischen als auch nichtnumerischen Charakter haben können. Bei der Datenverarbeitung kommt es weniger auf komplizierte Rechenprogramme als auf schnelle Ein- und Ausgabe sowie schnelle Umordnung der Daten an. Man unterscheidet zwischen partieller und integrierter Datenverarbeitung. *Partielle Datenverarbeitung* ist die getrennte Bearbeitung verschiedener Datenverarbeitungsaufgaben mit jeweils erneuter Datenerfassung. Da alle Daten neu erfaßt und auf maschinenlesbare Datenträger gebracht werden müssen, ist die Form dieser Datenverarbeitung nicht sehr ökonomisch. Unter *integrierter Datenverarbeitung* versteht man die

abgestimmte Bearbeitung verschiedener Datenverarbeitungsaufgaben mit nur einmaliger Datenerfassung von Primärdaten. Wichtige Betriebsarten bei der Datenverarbeitung sind die schritthaltende Datenverarbeitung (*Echtzeitbetrieb*) und der zeitaufteilende Betrieb (*Zeitmultiplexbetrieb*).

Die Datenverarbeitung läßt sich entsprechend dem Niveau in *manuelle Datenverarbeitung* (z. T. mit einfachen Hilfsmitteln) und *maschinelle Datenverarbeitung* (mit Hilfe mechanischer Büromaschinen, Lochkartenmaschinen oder mit Hilfe von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen bzw. Digitalrechnern) unterteilen. Im weiteren Sinne versteht man unter elektronischer Datenverarbeitung jede Form der Datenverarbeitung mittels elektronischer Digitalrechner, also auch mit Prozeß- und Klein- sowie Mikrorechnern. Im engeren Sinne versteht man darunter die Datenverarbeitung mit Hilfe universeller Digitalrechner. Nicht zur elektronischen Datenverarbeitung zählt die mittlere Datentechnik. Zu ihr gehören z. B. Fakturiermaschinen und Buchungsautomaten, obwohl auch hier zunehmend elektronische Bauelemente eingesetzt werden.

Anwendung der elektronischen Datenverarbeitung. Die elektronische Datenverarbeitung ist ein wichtiges Rationalisierungsmittel. Ihr Hauptanwendungsgebiet für die Automatisierung industrieller Prozesse ist in der *Prozeßrechentechnik* (vgl. 14.3.6.) die Erfassung und Verarbeitung von Daten mit Hilfe von Prozeßrechnern, die direkt mit dem Prozeß gekoppelt sind (Prozeßdatenverarbeitung, On-line-Verarbeitung, Echtzeitverarbeitung). Die elektronische Datenverarbeitung wird in allen Teilen des Reproduktionsprozesses angewendet, beginnend mit der Forschung und Entwicklung über die Produktionsvorbereitung bis hin zur Leitung und Planung des Produktionsprozesses selbst sowie zur Lösung von Aufgaben des Absatzes und der Zirkulationssphäre. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist die Medizin, wobei man grundsätzlich unterscheidet zwischen allgemeinen Anwendungsfällen, die denen in anderen Wirtschaftszweigen artverwandt sind, und medizinspezifischen Anwendungsgebieten. Zur ersten Gruppe zählen alle Aufgaben der Leitung, Planung und Organisation des Gesundheitsschutzes, wie die Erstellung und Auswertung von dokumentationsgerechten Krankenblättern, Rezeptformularen und Schwangerenkarteikarten. Ferner gehören hierzu Probleme der Kostenrechnung, Bettenauslastung, Arzneimittelplanung usw. Die medizinspezifischen Fragestellungen werden durch Methoden zur Automatisierung der Diagnose repräsentiert. Es handelt sich hierbei um die Umsetzung der ärztlichen Erfahrung in eine rechnergerechte Form, um Ärzte und medizinisches Personal von zeitaufwendiger

Routinearbeit zu entlasten und durch eine Datenbank auch weniger häufig genutztes Wissen jederzeit schnell zugänglich zu machen. Der im *Rechnungswesen* mittels Datenverarbeitung erreichbare Automatisierungsgrad ist meist größer als bei Problemen der Entwicklung und Konstruktion. Der erreichbare Nutzen ist jedoch bei wissenschaftlich-technischen Berechnungen meist unverhältnismäßig größer als auf dem Gebiet der Abrechnung.
Wesentliche Beiträge zum Nutzen der maschinellen Datenverarbeitung leisten insbesondere:
– der *Rationalisierungseffekt*, vor allem die mögliche Senkung des Arbeitsaufwandes, der Umlaufmittel usw.,
– der *Optimierungseffekt*, insbesondere hinsichtlich optimaler Konstruktionen und optimaler Gestaltung von Produktionsprozessen,
– der *Informationseffekt*, vorrangig die effektive und schnelle Nutzung zur Verfügung stehender aussagekräftiger und vollständiger Informationen,
– der *Integrationseffekt*, speziell die mehrfache Auswertung einmal erfaßter Primärdaten für verschiedene Datenverarbeitungsaufgaben.

14.3.6. Prozeßrechentechnik

Übersicht über eine Prozeßrechenanlage. *Digitalrechner*, die für wissenschaftlich-technische Rechnungen, z. B. die statische Berechnung eines Bauwerks, oder ökonomische Rechnungen, z. B. die Lohnberechnung in einem Betrieb, eingesetzt sind, arbeiten im *Off-line-Betrieb* (vgl. 14.3.3.).
Im Unterschied dazu arbeiten Rechner, die Bestandteil einer Automatisierungsanlage sind, im *On-line-Betrieb* (vgl. 14.3.3.). Diese sog. *Prozeßrechner* erhalten ihre Eingangsinformationen von dem zu automatisierenden Prozeß, z. B. einem Erdölverarbeitungsprozeß, und geben die Ergebnisse wieder an den Prozeß aus. Die Verarbeitungsfunktionen müssen zeitlich so ausgeführt werden, wie sie der angeschlossene Prozeß erfordert. Die *Zentraleinheit* eines Prozeßrechners bildet ein Digitalrechner, der über die für den *Echtzeitbetrieb* (*Real-time-Betrieb*) notwendigen Eigenschaften verfügt. Die Verbindung zwischen der Zentraleinheit und den am Prozeß angeordneten Meß- und Stelleinrichtungen stellt die *Prozeßein- und -ausgabeeinrichtung* her. Sie wandelt einerseits die von den Meßeinrichtungen (vgl. 14.1.1.) abgegebenen Signale in eine dem Rechner verständliche Form um und überträgt sie zum Rechner und bereitet andererseits die vom Rechner ausgegebenen Steuerbefehle so auf, daß sie zur Ansteuerung der Stelleinrichtungen (vgl. 14.2.4.) geeignet sind. Die Prozeßein- und -ausgabeeinrichtungen werden auch als *erste Peripherie*, die Meß- und Stelleinrichtungen auch als *zweite Peripherie* des Prozeßrechners bezeichnet (vgl. 14.3.3.). Daneben besitzen Prozeßrechenanlagen noch in gewissem Umfang Datenverarbeitungsperipherie, wie Drucker, Lochbandstanzer, Lochbandleser und externe Speicher (vgl. 14.3.3.). Die Verbindung zwischen Anlagenfahrer (Bediener, Operator) und Prozeßrechenanlage wird über ein *Bedienpult* hergestellt, in dem anwendungsspezifisch die erforderlichen Kommunikationsmittel, wie Bildschirmgerät, Tasten, Anzeigelampen und Ziffernanzeigeeinheiten zusammengefaßt sind.
Merkmale eines Prozeßrechners. Ein Prozeßrechner muß in der Lage sein, zu bestimmten Zeitpunkten Schalthandlungen vorzunehmen, Signale bestimmter Dauer auszugeben, zeitbezogene Größen zu berechnen und Protokolle mit Zeitangaben auszudrucken. Diese Möglichkeit erhält er durch einen eingebauten *Zeitgeber* (*Timer*). Dazu wird i. allg. ein quarzgesteuerter Taktgenerator verwendet, aus dessen Impulsfolge durch das Rechnerprogramm alle benötigten Zeitintervalle und Zeitpunkte abgeleitet werden können.
In einem Prozeßrechner müssen mehrere verschieden wichtige Vorgänge simultan bearbeitet werden, wobei jedoch nicht voraussehbar ist, wann die Notwendigkeit zur Bearbeitung der einzelnen Vorgänge entsteht. Während eines Protokollausdrucks kann z. B. eine Bedienungsanforderung durch den Anlagenfahrer und eine Alarmmeldung von einem Endlagenschalter eintreffen. In diesem Falle muß der Protokolldruck unterbrochen und zunächst auf die Alarmmeldung und dann auf die Bedienungsanforderung reagiert werden. Das wird durch das *Unterbrechungssystem mit Vorrangsteuerung* (*Prioritätssteuerung*) ermöglicht. Bestimmte Signale (Vorrangmeldungen) lösen im Rechner die Unterbrechung des laufenden Programms, Prüfung der Vorrangsituation und Bearbeitung des Programms mit dem jeweils höchsten Vorrang aus. Unterbrochene Programme werden anschließend ohne Informationsverlust fortgesetzt.
Damit die *Reaktionszeit* auch bei einer Häufung von Anforderungen noch in vertretbaren Grenzen bleibt und keine Aufgaben unbearbeitet bleiben, muß der Prozeßrechner über eine ausreichende Leistungsfähigkeit verfügen. Meist stammen die Prozeßrechner aus der Klasse der Kleinrechner; neuerdings werden Prozeßrechneraufgaben auch von *Mikrocomputern*, das sind Rechner, deren Steuer- und Verarbeitungseinheit auf einem oder wenigen hochintegrierten Bauelementen (Mikroprozessoren, vgl. 14.3.3.) untergebracht sind, übernommen.
Ein Prozeßrechner wird meist in der Nähe des zu steuernden Prozesses aufgestellt; er muß daher den erhöhten Forderungen bezüglich Umgebungsbedingungen genügen, wie sie für Automatisierungsanlagen gestellt werden. Ferner

wird von einem Prozeßrechner eine sehr hohe Zuverlässigkeit verlangt, da sein Ausfall zu großen Folgeschäden führen kann. Wesentliches Merkmal eines Prozeßrechners ist das Vorhandensein einer Einrichtung zur ein- und ausgangsseitigen ständigen Verbindung mit dem zu steuernden Prozeß.

Prozeßein- und -ausgabeeinrichtungen. Entsprechend den unterschiedlichen Formen von Prozeßsignalen besteht eine Prozeßein- und -ausgabeeinrichtung aus unterschiedlichen Einheiten, die in Abhängigkeit von dem zu steuernden Prozeß bei jedem Einsatzfall in ihrer Art und Anzahl variiert werden.

Bei der Überwachung und Steuerung industrieller Prozesse muß mit hohen Störspannungen gerechnet werden, die die Meß- und Steuerwerte verfälschen könnten. Die Prozeßein- und -ausgabeeinheiten sind daher besonders gegen Störspannungen geschützt. Dies wird durch galvanische Trennung sowohl der digitalen als auch der analogen Kreise, einwandfreie Erdung, gute Abschirmung usw. erreicht.

Beim Anschluß von Meßeinrichtungen, die in explosionsgefährdeten Räumen untergebracht sind, müssen für die Prozeßeingabeeinheiten *eigensichere Ausführungen* eingesetzt werden. Eine eigensichere Prozeßeingabeeinheit ist so aufgebaut, daß kein elektrischer Funke entstehen kann, der ein zündfähiges Gemisch zur Explosion bringt.

Um nicht für jeden Typ von Meß- oder Stelleinrichtung eine gesonderte Ein- oder Ausgabeeinheit entwickeln zu müssen, stützt man sich bei der Festlegung der Schnittstelle zwischen erster und zweiter Prozeßperipherie auf festgelegte *Einheitssignale* für die Ausgänge von Meßeinrichtungen und die Eingänge von Stelleinrichtungen. Die wichtigsten Einheitssignale sind die Binärsignale 0/12 V, 0/24 V, 0/60 V und die Analogsignale 0 bis 10 V, −10 bis 0 bis +10 V, 0 bis 5 mA. Als Schnittstelle für binäre Signale wird oft ein offener/geschlossener potentialfreier Kontakt verwendet, der mit der gewünschten Spannung versorgt ein entsprechendes Signal liefert. Neben den Einheitssignalen werden auch *natürliche Abbildungssignale* von Meßwertgebern verwendet, z. B. das Signal 0 bis 10 mV für Thermoelemente.

Aus Gründen der einfachen Auf- und Abrüstbarkeit sowie der Vorteile bei der Entwicklung, Fertigung, Prüfung und Projektierung wird auch die Schnittstelle zwischen der Zentraleinheit und den Prozeßein- und -ausgabeeinheiten nicht willkürlich gewählt, sondern ein *Standard-Interface* verwendet (vgl. 14.3.3.).

Digitaleingabeeinheiten für statische Signale dienen zur Erfassung von binären oder digitalen Signalen (vgl. 14.3.2.), wie sie z. B. von Relaiskontakten, Endlagenschaltern, Grenzwertschaltern, Tastenschaltern oder dezentralen logischen Elementen der Steuerungstechnik geliefert werden. Wahlweise kann von einer Gruppe binärer Signale ein Programmunterbrechungssignal abgeleitet werden, so daß z. B. das Schalten eines Grenzwertschalters zum Aufruf eines Alarmprogramms in der Zentraleinheit führen kann.

Digitaleingabeeinheiten für dynamische Signale wirken ähnlich, wie die Digitaleingabe für statische Signale, jedoch werden die ankommenden binären Signale gespeichert, so daß sie nicht verlorengehen, auch wenn sie nur kurzzeitig auftreten, z. B. beim Drücken einer nichtrastenden Taste.

Impulseingabeeinheiten ermöglichen die Erfassung der Signale von Mengenmeßeinrichtungen nach dem Zählprinzip (jeder Impuls bedeutet eine Volumeneinheit, ein Werkstück, die Umdrehung einer Welle usw.). Die einlaufenden Impulse werden gezählt und können vom Rechner abgefragt werden. Die Abfrage kann auch auf Anreiz erfolgen; dazu geben die Zähler in der Impulseingabeeinheit z. B. bei Überschreitung von 50% oder 100% des maximalen Zählvolumens ein Programmunterbrechungssignal ab. Des weiteren können die Zähler durch den Rechner voreinstellbar sein oder als Vor-Rückwärtszähler betreibbar sein.

Digitalausgabeeinheiten für statische Signale dienen dazu, Signale vom Rechner auf ein binäres Stellglied (der Begriff Stellglied ist hier im verallgemeinerten Sinne gebraucht), wie z. B. auf ein Magnetventil, ein Schütz, einen Motor oder eine Lampe auszugeben. Gruppen binärer Signale können wiederum als digitale Signale betrachtet und z. B. auf einer Ziffernanzeigeeinheit dargestellt werden. Die ausgegebenen Signale bleiben in der Ausgabeeinheit gespeichert, bis sie durch eine erneute Ausgabe vom Rechner überschrieben werden.

Digitalausgabeeinheiten für dynamische Signale werden z. B. zur Ansteuerung von Schrittschaltwerken eingesetzt. Im Unterschied zur statischen Digitalausgabe kehren die ausgegebenen „1"-Signale nach einer festen Zeit, z. B. 10 oder 100 ms, von selbst in den „0"-Zustand zurück.

Analogeingabeeinheiten (Abb. 14.3.6-1) dienen zur Erfassung der Ausgangssignale von analogen Meßeinrichtungen, wie Thermoelementen, Widerstandsthermometern und Druckmeßeinrichtungen. Die Meßgröße, die in der Meßeinrichtung in ein elektrisches Signal umgewandelt wurde, wird in der Eingabeeinheit gefiltert, eventuell verstärkt und anschließend in einen Digitalwert umgesetzt. Außerdem erfolgt meist eine Meßstellenumschaltung, da Zentralverstärker und Analog-Digital-Umsetzer einen relativ hohen Aufwand darstellen, den man für mehrere, z. B. 512, Meßstellen nur einmal treibt. Besonders bei kleinen Eingangssignalen, z. B. den natürlichen Abbildungssignalen von Thermoelementen, wird

zur Unterdrückung von Gleichtaktstörspannungen, die durch unterschiedliches Erdpotential am Meßort und am Aufstellungsort des Prozeßrechners verursacht werden, die Meßerde und der Schirm mit umgeschaltet und der Zentralverstärker galvanisch getrennt mit sehr hohem Eingangswiderstand ausgeführt. Die Analog-Digital-Umsetzung erfolgt mit einer Auflösung von 8 bis 12 Bits (bei bipolaren Signalen zusätzlich noch ein Vorzeichenbit). Je nach dem verwendeten Umsetzverfahren charakterisiert man die Analog-Digital-Umsetzer als Stufenkompensator, Sägezahn-Umsetzer, Spannungs-Frequenz-Umsetzer oder Dual-Slope-Umsetzer.

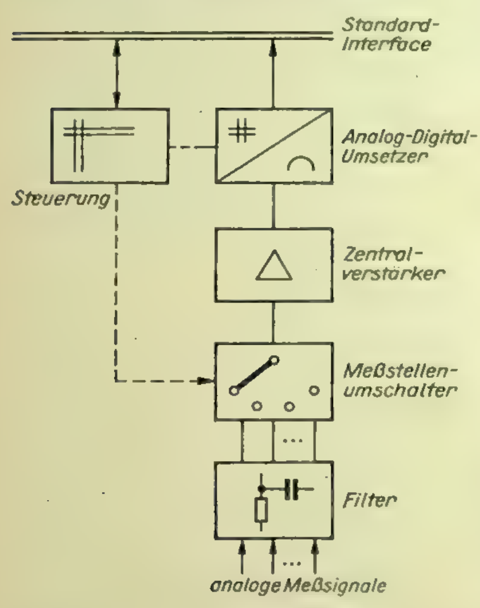


Abb. 14.3.6-1 Blockschaltbild einer Analogeingabeeinheit

Analogausgabeeinheiten für Spannungs- oder Stromsignale werden u. a. zur Ansteuerung von Reglern, stetigen Stelleinrichtungen, Anzeigeinstrumenten und Analogschreibern verwendet. Es gibt 2 Ausführungsformen. Bei der ersten Form werden die vom Rechner in digitaler Darstellung ausgegebenen Steuerwerte für jeden Kanal digital gespeichert und in ein analoges Amplitudensignal umgewandelt. Bei der zweiten Form werden die Digitalwerte durch einen zentralen Digital-Analog-Wandler in Analogwerte gewandelt und über einen Umschalter in analoge Halteverstärker, die den Ausgabekanälen zugeordnet sind, übertragen. Die Auflösung beträgt zwischen 12 + 1 Bit und 8 Bit. Als Methode der Digital-Analog-Wandlung wird die Summation abgestufter Teilströme verwendet.

Analogausgabeeinheiten für Impulsdauer- und Impulszahlsignale werden in erster Linie zur Ansteuerung von Regler-Leitgeräten bei der rechnergeführten Regelung (RGR) oder zur Ansteuerung von Stelleinrichtungen bei der digitalen Regelung eingesetzt. Der vom Rechner ausgegebene Digitalwert wird in eine proportionale Impulszahl (z. B. 0 bis 255 Impulse mit einer Frequenz von 50 Hz sowie je ein Kontakt für Rechts- und Linkslauf, die durch das Vorzeichenbit gesteuert werden) oder eine entsprechende Impulsdauer umgewandelt, so daß eine quasi-analoge Zeitgröße entsteht. Das Ausgangssignal wird in den nachgeschalteten Geräten von Synchron- oder Schrittmotoren aufgenommen. Zu beachten ist, daß es sich hier um eine Inkrementausgabe handelt, d. h. es wird jeweils die Änderung gegenüber der vorhergehenden Stellung der Motoren ausgegeben.

Koppeleinrichtungen. Ein Prozeßrechner kann entweder bei der Automatisierung eines abgegrenzten Prozesses im Inselbetrieb arbeiten, oder er kann in einem *Hierarchiesystem* mit einem übergeordneten Rechner gekoppelt sein. Im letzteren Falle sind Übertragungseinrichtungen erforderlich, die Prozeßrechner untereinander oder Prozeßrechner mit einer Datenverarbeitungsanlage verbinden. Bei kurzen Entfernungen werden dafür *Rechner-Rechner-Kopplungen*, bei großen Entfernungen *Datenübertragungsanlagen* eingesetzt.

Außerdem erfordert die Automatisierung weitverzweigter Prozesse, wie Rohrleitungsnetze, Energiesysteme u. a., daß Meß- und Steuerwerte dezentral gesammelt bzw. verteilt werden. In diesen Fällen werden *Fernwirkeinrichtungen* als Zubringer für Prozeßrechner eingesetzt (vgl. 14.2.7.).

Prozeßrechner-Software. Die Gerätetechnik (*Hardware*) macht nur etwa die Hälfte der Gesamtkosten eines Prozeßrechner-Einsatzes aus; die andere Hälfte entfällt auf die Programme (*Software*).

Ein Teil der Software läßt sich universell gestalten; sie wird deshalb vom Prozeßrechnerhersteller entwickelt und mitgeliefert. Dazu gehört das *Betriebssystem* mit den Teilen:

Organisationsprogramm (*Supervisor*, *Leitprogramm*, *Steuerprogrammsystem*). Es verwaltet die Abarbeitung der Programme und koordiniert die Benutzung von Peripheriegeräten und Speicherbereichen. Dazu muß es Programme starten und deren Beendigung zur Kenntnis nehmen, Warteschlangen organisieren, Programmunterbrechungen behandeln, Ein-Ausgabe-Verkehre steuern, eine Fehlerüberwachung durchführen, die Verbindung mit dem Bediener herstellen und eventuell Speicherbereiche schützen.

Übersetzungsprogramme werden durch Assembler und Compiler realisiert (vgl. 14.3.4.).

Dienstprogramme sind Programme, die beim Laden und Testen von Programmen behilflich sind.

Standard-Unterprogramme lösen bestimmte, häufig wiederkehrende Aufgaben, wie Codewandlung, arithmetische Berechnungen und Ein/Ausgabe.
Im Gegensatz zu dem universellen Charakter des Betriebssystems lösen die *Anwenderprogramme* Aufgaben entsprechend dem jeweiligen Einsatzfall des Prozeßrechners. Für häufig wiederkehrende Aufgabenkomplexe werden Programmsysteme geschaffen, die aus Bausteinen aufgebaut sind und eine Modifizierung erlauben. Die Form der Teil- und Unterprogramme, ihre Datenorganisation sowie die Methode der Erzeugung des Programmsystems aus den Programmbausteinen werden vom Hersteller vorgegeben bzw. mitgeliefert.
Aufgaben von Prozeßrechnern. Die im folgenden genannten Aufgaben bzw. Einsatzstufen kommen in der Praxis meist kombiniert vor, wobei die niederen Stufen in den höheren enthalten sind.
Meßwerterfassung ist die Abfrage von Meßeinrichtungen, gestartet durch Zeitbedingungen, Alarmmeldungen, Anforderungen des Bedieners oder Verarbeitungsprogramme.
Meßwertverarbeitung. Hierzu zählen z. B. lineare Umrechnung von Meßwerten, Vergleich mit Grenzwerten, Berücksichtigung von Korrekturfaktoren und die Verknüpfung mehrerer Meßwerte.
Rechnergeführte Regelung, RGR (supervisory digital control, SDC). Hierbei werden vom Prozeßrechner die Sollwerte für dezentrale Regler vorgegeben.
Direkte digitale Regelung (direct digital control, DDC). Der Prozeßrechner wirkt als zentraler Regler, der zeitmultiplex mehrere Regelstrecken bedient; er gibt Stellgrößen an die Stelleinrichtungen aus (vgl. 14.2.6.).
Optimierung. Der gesamte Prozeß wird durch den Prozeßrechner so geführt, daß ein Optimierungskriterium einen Extremwert erreicht, z. B. maximaler Produktionsausstoß, geringster Energieverbrauch, kürzester Transportweg, beste Qualität, beste Rohstoffausnutzung.
Optimierung, Modellierung. Die Optimierung eines Prozesses verlangt vom Prozeßrechner, daß er Veränderungen der unabhängigen Prozeßvariablen, wie Temperaturen, Durchflußmengen, Drücke usw., vornimmt, die eine abhängige Prozeßvariable, z. B. den Wirkungsgrad, im gewünschten Sinne beeinflussen, wobei bestimmte Grenzwerte einzuhalten sind, um z. B. die Sicherheit des Prozesses zu gewährleisten.
Eine Methode besteht darin, im Prozeßrechner ein Modell des Prozesses gespeichert zu haben, dem die erforderlichen Reaktionen auf Störgrößen zu entnehmen sind. Solche *Prozeßmodelle* können entweder auf analytischem Wege (sofern die mathematischen Zusammenhänge bekannt sind) oder durch statistische Methoden, z. B. durch Regressionsanalyse, gewonnen werden. Bereits bei der Gewinnung der Ausgangsinformationen für das Modell (*Prozeßerkennung*) sowie bei der laufenden Anpassung und Verbesserung (Adaptierung, lernendes Modell) läßt sich der Prozeßrechner vorteilhaft einsetzen.
Eine weitere Optimierungsmethode besteht darin, laufend kleine Änderungen der unabhängigen Prozeßvariablen durchzuführen und festzustellen, wie sich diese auf das Optimierungskriterium auswirken. Solche *Suchstrategien* lassen sich darstellen als die Annäherung an das Extremum einer mehrdimensionalen Funktion durch sukzessive Approximation.

14.3.7. Numerische Steuerung

Industrielle Steuerungen, bei denen Bewegungen und Positionierungen von Maschinenteilen bzw. Werkzeugen nach Zifferninformationen erfolgen, werden als *numerische Steuerungen* bezeichnet. Sie erfordern die Eingabe, Speicherung, Verarbeitung und Nutzung der Informationen in kodierter Form, meist in einem geeigneten Binärkode. Ihr Hauptanwendungsgebiet sind Be- und Verarbeitungsmaschinen, insbesondere Werkzeugmaschinen, da sich hierbei Bewegungsabläufe und Positioniervorgänge in numerischer, d. h. ziffernmäßiger Darstellung entsprechend den Maßangaben in der Bearbeitungszeichnung direkt ergeben.
Eingabe. Die Eingangssignale numerischer Steuerungen werden von Lochbändern und von Wegmeßsystemen an der zu steuernden Maschine gewonnen. Das Lochband enthält in einem einheitlichen 8-Spur-Kode alle Einstellwerte und Koordinaten in der Reihenfolge der Bearbeitung sowie Maschinenbefehle, die Drehzahlen, Vorschübe, Eilgänge, Werkzeugwechsel und die Steuerung der Schmiermittelpumpe betreffen. Zur digitalen Wegmessung werden das *Inkrementalverfahren* mit Strichlinealen bzw. -scheiben und das *Absolutverfahren* mit Kodelinealen bzw. -scheiben angewendet.
Inkrementalverfahren. Ausgehend von einem definierten Nullpunkt werden die Bewegungen an einem feinen Strichraster als Impulse, z. B. 10 Impulse ≙ 1 mm, erfaßt und von einem Vorwärts-/Rückwärtszähler aufaddiert und gespeichert (Abb. 14.3.7-1). Der aktuelle Zählerstand kennzeichnet den in Vorwärtsrichtung zurückgelegten Weg. Durch ein spezielles Abtastverfahren wird erreicht, daß bei Richtungsumkehr keine Zählimpulse verlorengehen oder doppelt gezählt werden. Jeder Fehler beim Zählvorgang würde eine Nullpunktverschiebung vortäuschen und zu Positionierfehlern führen. Die nach gleichem Prinzip arbeitenden Strichscheiben erfassen Rotationsvorgänge, z. B. an Vorschubspindeln oder Getriebewellen. Zur fehlerfreien Wegmessung

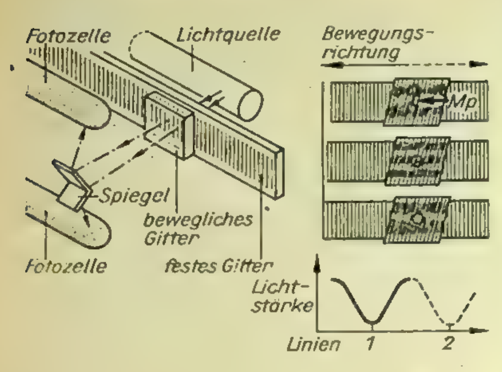


Abb. 14.3.7-1 Prinzip des Inkrementalverfahrens

sind möglichst spielfreie Spindeln, z. B. Kugelumlaufspindeln, und Getriebe einzusetzen. Die Abtastung des Strichrasters erfolgt fotoelektrisch durch Lampen mit Linsensystemen und Fotodioden bzw. -zellen.

Absolutverfahren. Durch Abtastung eines Kodelineals oder einer Kodescheibe kann der Absolutwert einer Längs- oder Drehbewegung digital erfaßt werden. Die Anzahl der parallelen Spuren bestimmt die Meßgenauigkeit. Die Abtastung kann fotoelektrisch oder durch Kontakte erfolgen.

Steuerung. Aus den Eingabewerten werden in der Steuereinrichtung die Signale für die Stell- sowie Haupt- und Hilfsantriebe gewonnen. Die Stellbewegungen kommen immer dann zur Ruhe, wenn der gemessene Istwert mit dem vorgegebenen Sollwert übereinstimmt. Dieses Verfahren entspricht einer Lageregelung. Dabei werden Besonderheiten der Werkzeugmaschine, wie beispielsweise der Durchmesser des Fräsers, berücksichtigt.

Punkt- oder Positioniersteuerung. Bestimmte Punkte in einem Koordinatensystem werden nacheinander angefahren. Nach der Positionierung beginnt die Bearbeitung, z. B. durch Bohren.

Streckensteuerung. Die Bewegung des Werkzeugs oder Werkstücks läuft parallel zur Koordinatenrichtung. Die Bearbeitung erfolgt während der Bewegung.

Bahnsteuerung. Eine beliebige ebene oder räumliche Bewegungsbahn wird in kleine rechteckige Stufen zerlegt. Zwischen den Einzelbewegungen in den Koordinaten besteht kein zeitlicher oder funktioneller Zusammenhang.

Stetigbahnsteuerung. Die Bewegungen in den einzelnen Koordinaten laufen nebeneinander in zeitlichem oder funktionellem Zusammenhang ab. Infolge kontinuierlicher Bewegung des Werkzeugs oder Werkstücks kann jede beliebige ebene oder räumliche Kurve erzeugt werden.

Stelleinrichtung. Die Stellantriebe numerischer Steuerungen sind meist mit *Schrittmotoren* ausgerüstet. Das sind spezielle, mit Impulsen angesteuerte Motoren, die mit jedem Impuls einen definierten Drehwinkel erzeugen und nach jedem Schritt ohne Nachlauf stillgesetzt werden können. Sie gestatten die genaue und reproduzierbare Positionierung von Werkzeugen oder Werkstücken. Die Drehbewegung wird über spielfreie und leichtgängige Kugelumlaufspindeln in eine Vorschubbewegung umgesetzt. Es werden Positioniergenauigkeiten von 0,1 bis 0,005 mm erreicht.

Einsatz numerischer Steuerungen. Numerische Steuerungen ermöglichen bei Lehrenbohrwerken, Dreh- und Fräsmaschinen die wirtschaftliche Fertigung vorwiegend großer Serien, wobei die Fertigungsabläufe einschließlich Zuführung und Abtransport der Werkstücke weitgehend automatisiert werden können. Als günstig hat sich die Konzentration numerisch gesteuerter Maschinen, NC-Maschinen, in Bearbeitungszentren erwiesen.

Industrieroboter sind weiterentwickelte und in ihren Funktionen vervollkommnete Manipulatoren. *Manipulatoren* sind steuerbare Halte- und Greifereinrichtungen, die in mehreren Achsen (rotatorisch und translatorisch) frei beweglich sind. Sie erweitern den Arbeitsbereich des Bedienenden und gestatten die Verrichtung von Arbeitsvorgängen, bei denen der Bedienende sich entweder außerhalb eines Gefahrenbereichs (Hitze, radioaktive Strahlung) befindet oder nur noch die Programmierung des Manipulators vornimmt. Manipulatoren sind häufig mit Nachbildungen der menschlichen Hand ausgerüstet, durch die spezielle Greif- oder Bearbeitungswerkzeuge aufgenommen und betätigt werden können.

Bei der Vervollkommnung des Manipulators zum Industrieroboter werden Meßfühler, Mikrorechner und programmierbare Steuerungen, z. T. auch adaptive Systeme mit verwendet, und bestimmte Steuervorgänge werden zu Regelungen. Damit kann der Automat sein Verhalten veränderten Parametern des Werkstücks oder Werkzeugs in begrenztem Maße selbst anpassen. Industrieroboter werden vor allem für technologische Operationen in der automatisierten Stückfertigung eingesetzt, z. B. Punktschweißen (z. B. von Karosserieteilen, Tafel 33), Lichtbogenschweißen, Verkleben, Entgraten, Polieren, Putzen von Gußteilen, Montage von Maschinenteilen, Kontrollmessungen an Kraftfahrzeugkarosserien. Ein weiterer Einsatzfall ist die Bestückung von Kernreaktoren mit Brennstäben.

15. Bautechnik

Das Bauwesen hat für die Volkswirtschaft und die Gestaltung der Umwelt besondere Bedeutung, da es einerseits durch die Errichtung und Erhaltung von Wohn-, Gesellschafts- und Industriebauten günstige Lebens- und Arbeitsbedingungen schafft und andererseits zur Durchführung der Bauproduktion Zulieferungen aus vielen Industriezweigen notwendig sind. Durch die industriellen Fertigungsmethoden wurde auch im Bauwesen der Übergang von der handwerklich ausgerichteten Arbeitsweise zum industriellen Bauen vollzogen. Dadurch und durch den Einsatz leistungsfähiger Maschinenkomplexe wurden Arbeitsproduktivität und Wirkungsgrad der Bauindustrie wesentlich erhöht. Der bei der überwiegend handwerklichen Errichtung von Gebäuden übliche *Anpaßbau* ist weitgehend durch die industrielle Methode des *Austauschbaus* verdrängt worden.

15.1. Allgemeines zum Bauwesen

Die Industrialisierung der Bauprozesse führte zu einer teilweisen Integration verschiedener Gewerke. Prozesse der instationären Bauausführung wurden in die stationäre Vorfertigung überführt. Durch die Vorfertigung komplettierter und oberflächenfertiger Bauelemente, wie Wände, Decken, und ganzer Raumzellen werden Roh- und Ausbauprozesse mehr und mehr zusammengefaßt.

15.1.1. Probleme des industriellen Bauens

Das industrielle Bauen erfordert anstelle empirischer die Anwendung wissenschaftlicher Methoden der Produktionsvorbereitung und Fertigungsorganisation auf den Baustellen und in den Vorfertigungsbetrieben, z. B. Betonwerke, eine hohe Gleichmäßigkeit der Produktion und eine einheitliche Leitung der Projektierungs- und Vorbereitungsprozesse der Bau-, Montage- und Ausbauarbeiten. Es setzt eine aufeinander abgestimmte Standardisierung und Typisierung der Bauelemente voraus, die stofflich, fertigungstechnisch und in ihren Abmessungen gleich oder ähnlich sind, um durch große Loszahlen die Effektivität der Vorfertigungseinrichtungen und der Montageausrüstungen zu gewährleisten. Das Prinzip des Austauschbaus als ein wichtiges Merkmal des industriellen Bauens erfordert in der Vorfertigung eine hohe Genauigkeit (Einhaltung der voraus festgelegten Genauigkeitsklasse und der zulässigen Toleranzen) der Bauelemente und bei der Montage eine exakte Justierung der Montageelemente.

Maßordnung im Bauwesen. Die Maßordnung im Bauwesen beruht auf dem Dezimetersystem, das Grundmaß auf dem Meter. Die Grundeinheit ist der *Modul* (M = 100 mm). Von ihm werden die Reihen ($^1/_{20}$; $^1/_2$; 1; 2; 3; . . . M) für die *Baustandardmaße* (Ms) und das *Rastermaß* (Abstand zweier Rasterlinien oder -ebenen) abgeleitet. Das Raster ist ein ebenes oder räumliches Gitter aus parallelen und sich rechtwinklig kreuzenden Rasterlinien im Abstand von Baustandardmaßen.

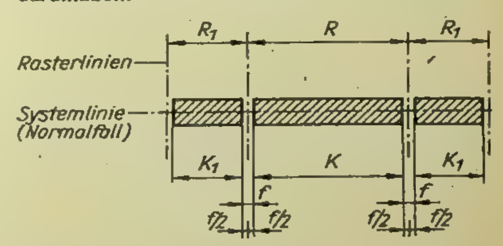


Abb. 15.1.1-1 Lage eines Bauelements und seine Zuordnung zur Systemlinie ($K = R - 2 \cdot f/2$)

Das *Baurichtmaß R* (Abb. 15.1.1-1) ist ein Baustandardmaß, wird durch Rasterlinien begrenzt und gibt den für ein Gebäude, Segment bzw. Bauelement vorgesehenen Raum an. Das *Konstruktionsmaß K* entspricht dem Baurichtmaß R abzüglich der Fugenanteile f zwischen den Bauelementen.

Bauweisen und Konstruktionsprinzipe. Die *Bauweisen* werden bezeichnet nach:
– den Baustoffen,

– der Form der Primärstruktur, z. B. Wand-, Schalen-, Skelettbauweise,
– den Herstellungsmethoden des Bauwerks, z. B. Monolith- oder Montagebau.
Das zu wählende *Konstruktionsprinzip* ist abhängig von den spezifischen Eigenschaften der Baustoffe (Druck-, Zug-, Biegefestigkeit) und der Art der Beanspruchung der Tragkonstruktion (Richtung, statisch, dynamisch).
Im monolithischen Stein- und Betonbau werden die auftretenden Kräfte ohne wesentliche Umlenkung weitgehend als Druckkräfte in die Fundamente und in den Baugrund abgeführt.
Ein weiteres Konstruktionsprinzip ist die bevorzugte Anwendung auf Zug beanspruchter Teile, da bei ihnen im Gegensatz zu den auf Druck beanspruchten die Knickgefahr (Knickmoment) entfällt. Dadurch können für diese Teile dünnere Querschnitte genommen und das Massevolumen niedriger gehalten werden. Das Konstruktionsprinzip des *Leichtbaus* wird heute hauptsächlich im Stahlbau (Metalleichtbau) und im Spannbetonbau angewendet (vgl. 15.6.3., 15.7.4.).
Räumliche Tragwerke aus Spannbetonplatten oder Scheiben, auch aus Stahltafeln (Stahlbleche) zusammengefügt, werden als Faltwerke in der Baupraxis häufig angewendet. Aufgelöste räumliche Tragwerke als Stabwerkskonstruktionen aus Stahlrohren oder vorgespanntem Stahlbeton, vor allem für große Spannweiten, nehmen wechselnde Krafteinwirkungen besser auf und führen die Kräfte günstiger ab als kompakte Tragwerke.
Bauwerke, bei denen ausschließlich Zugkräfte auftreten, werden häufig als hängende Konstruktionen, wie Hängedächer und Seilnetze, ausgeführt.
Ein weiteres Konstruktionsprinzip stellen pneumatische Konstruktionen dar. Hierbei werden als Raumhülle aufblasbare, auf Zug beanspruchbare und mit PVC beschichtete textile Gewebe von unterschiedlichem Zuschnitt durch einen geringen Luftüberdruck von $\approx 10^{-4}$ N/mm^2 aufgerichtet und flächig stabilisiert. Die Anwendung dieses Konstruktionsprinzips eignet sich für bauliche Umhüllungen von Baustellen (Winterbau) oder für Lager- und Ausstellungsbauten.

15.1.2. Baustellenerschließung und Baustelleneinrichtung

Zur *Baustellenerschließung* gehört die Schaffung der erforderlichen Baufreiheit durch Abbruch- und Flächenberäumungsarbeiten, Anlegen von Zufahrtsstraßen, bei Großbaustellen Herstellung von Gleisanschlüssen, Zuführung von Baustrom und -wasser, z. T. auch von Dampf oder Warmwasser, und die Bereitstellung der Unterlagen für Umlagerungen u. a. Die *Baustelleneinrichtung* soll alle für die Durchführung eines Bauvorhabens notwendigen technologischen Voraussetzungen schaffen und die für die Arbeits- und Lebensbedingungen der auf der Baustelle Beschäftigten notwendigen sozialen und sanitären Einrichtungen besitzen. Die Bestandteile der Baustelleneinrichtung sind von der Art der Bauausführung, der Größe des Bauvorhabens und der vorgesehenen Bauzeit abhängig.
Zu ihr gehören:
– Anlegen offener oder überdeckter Lagerflächen für Schüttgüter, Betonfertigteile und Bauelemente, die nicht der Witterung voll ausgesetzt werden dürfen, z. B. Elemente aus Silikatbeton-Bauplatten,
– Aufstellen von transportablen Zementsilos und demontierbaren Lagerbauten (Traglufthallen) für witterungsempfindliche Baustoffe, Bauelemente oder Arbeitsgeräte und Hilfsbaustoffe (Nägel, Schrauben),
– Einrichten offener oder geschützter Arbeitsplätze (Werkstätten) für die Zubereitung von Bewehrungen oder Schalungen und zu Reparaturzwecken für Elektriker, Schlosser u. a.,
– Aufstellen der Betonaufbereitungsanlage,
– Anlegen von provisorischen oder endgültigen Straßen sowie von Strom- und Wasserleitungen für den Baustellenbetrieb,
– Errichtung von Unterkünften für Büros, Umkleide-, Speise- und Sanitätsräume.

15.1.3. Bauablauf

In der Bauindustrie haben sich 2 Organisationsformen bzw. -prinzipe durchgesetzt und in der Praxis bewährt.
Das *territoriale Prinzip* ist eine Zusammenfassung von Baukapazitäten im Bezirk, Kreis oder einer Stadt zu leistungsfähigeren Wohnungs- oder Industriebau- sowie Landbaukombinaten, die den bezirklichen oder örtlichen Organen unterstehen.
Das *Produktionsprinzip* ist eine Zusammenfassung von Baukapazitäten zu Spezial-Baukombinaten oder Spezial-Baubetrieben, die nur bestimmte Bauvorhaben (z. B. Kraftwerke und Chemieanlagen, Autobahnen, Talsperren) bzw. Spezialarbeiten (z. B. Sperrungen, Gleitbau) ausführen. Diese Betriebe oder Kombinate sind überbezirklich und unterstehen meistens dem Ministerium für Bauwesen.
Projektierung und technologische Bauvorbereitung sind als Betriebsteile der Baukombinate der Kombinatsleitung unterstellt.
Organisationsformen von großen Bauvorhaben des Wohn-, Gesellschafts- und Industriebaus sind *Investitionsbauleitung* als Organ des für die Investitionen verantwortlichen Auftraggebers und des *Generalauftragnehmers* (*GAN*), in der Regel das maßgebende Baukombinat (Baubetrieb), das die Verantwortung für das gesamte

Bauvorhaben trägt, einschließlich der von anderen Betrieben (Fremdbetrieben) zu bringenden Teilleistungen und Zulieferungen.

Fertigungsprinzipe. Bei der *Reihenfertigung* werden die einzelnen Objekte zeitlich nacheinander gebaut. Nachteile sind technologische Unterbrechungen, häufiger Wechsel der Arbeitskräfte und geringe Maschinenauslastung.

Bei *Parallelfertigung* laufen gleichartige Teilprozesse an mehreren Objekten zu gleicher Zeit ab. Nachteile sind der hohe Arbeitskräftebedarf und Maschinenbesatz sowie die aufwendige Baustelleneinrichtung.

Fließfertigung. Der Arbeitsablauf wird nach Taktstraßen geordnet, und die Ausführung der Teilprozesse erfolgt nach zeitlich aufeinander abgestimmten Takten. Gleichgeartete Teilprozesse werden von spezialisierten Brigaden – zeitlich abgestimmt – an mehreren Objekten ausgeführt. Die Fließfertigung vereinigt die Vorteile der vorgenannten Fertigungsprinzipe und wird auf Baustellen des Wohnungsbaus angewendet.

Methoden der Ablaufplanung. Die komplexe Ablaufplanung soll eine termingerechte und wirtschaftliche Durchführung einer Baumaßnahme sichern helfen und dient als Leitungsinstrument für einen ungestörten Arbeitsablauf. Der *Ablaufplan*, zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abgestimmt, umfaßt den Arbeitskräfte-, Maschinen- und Transportmitteleinsatzplan sowie die Termine für die Bereitstellung der Ausführungsunterlagen (Projekt), der Baustoffe (nach Menge und Qualität) und der finanziellen Mittel. Er kann, je nach Größe und Kompliziertheit des Bauvorhabens, als Balkendiagramm, Zyklogramm oder Netzplan ausgearbeitet und dargestellt werden (Abb. 15.1.3-1).

Im *Balkendiagramm* für kleine Bauvorhaben werden die Teilprozesse durch horizontale Balkengrafiken nach Zeit- und Produktionsabschnitten erfaßt.

Im *Zyklogramm*, das für größere Objekte geeignet ist, werden die einzelnen Teilprozesse in ansteigenden, sich überlappenden Linienzügen dargestellt.

Der *Netzplan* für große und komplizierte Bauvorhaben (z. B. Industrieanlagen) ist ein mathematisches Modell zur Ermittlung des kritischen Weges eines Bauablaufs, zur Darstellung der Aneinanderreihung technologisch abhängiger Teilprozesse (Aktivitäten) sowie zur Ermittlung und Angabe ihres Beginns und Endes (Ereignisse).

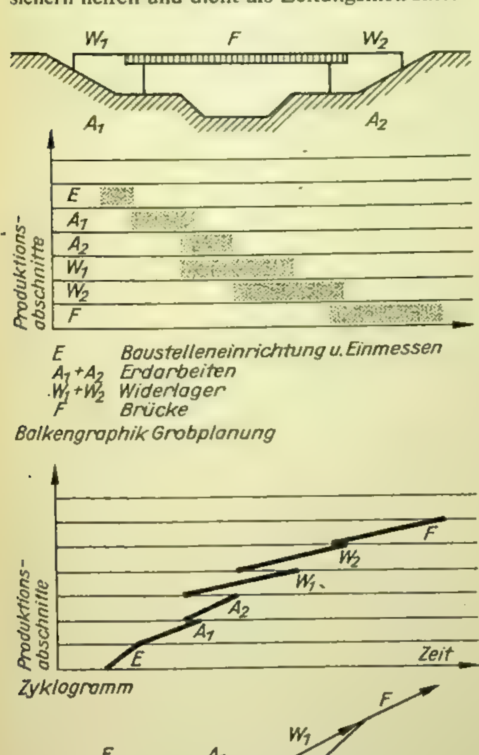


Abb. 15.1.3-1 Ablaufplanung

15.2. Baustoffe

Der Materialanteil an den Baukosten übersteigt i. allg. 50 %. Die Bauindustrie gehört deshalb zu den materialintensivsten Zweigen der Volkswirtschaft. Die genaue Kenntnis der Baustoffe, ihrer Eigenschaften und Lieferformen stellt für alle an der Errichtung eines Bauwerks Beteiligten eine unerläßliche Voraussetzung für eine ökonomische Fertigung dar. Die zweckentsprechende Auswahl und Verarbeitung der Baustoffe hat für den Bauerfolg die gleiche Bedeutung wie die sorgfältige Bearbeitung des Entwurfs oder des Festigkeitsnachweises. Mangelhafte Baustoffkenntnis führt leicht zu empfindlichen Bauschäden und damit zum Verlust an Geld, Baustoffen u. a.

15.2.1. Steine und Erden

Als Rohstoffe für die Baustoffindustrie haben diejenigen aus Steinen und Erden (vgl. 6.) entscheidende Bedeutung. Sie werden entweder nur mechanisch aufbereitet, wie z. B. Natursteine zu Splitt und Schotter (vgl. 1.6.4.), oder sie dienen als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Baustoffen in thermischen Verfahren, insbeson-

dere zur Herstellung von Baukeramik, -glas und Bindemitteln (Tab. 15.2.1-1).

Natursteine. Werksteine aus Naturstein zeichnen sich sowohl durch gute technische Eigenschaften wie auch durch schönes Aussehen aus. Sie sind deshalb gut geeignet, Baustoffe, wie Stahlbeton, Metalle, Glas und Plaste, vor allem bei repräsentativen Gebäuden, in ansprechender Weise zu ergänzen. Als Massenbaustoffe besitzen Natursteine allerdings nur für die Betonherstellung (vgl. 15.2.2.) und im Straßenbau (vgl. 15.11.4.) Bedeutung.

Zu Werksteinen werden hauptsächlich *Hartgesteine* verarbeitet, weil sich diese durch hohe Druckfestigkeit, gute Wetterbeständigkeit und schöne Farbe auszeichnen. Von den *Erstarrungsgesteinen* sind vor allem Granit, Syenit, Diorit, Diabas, Gabbro, Porphyr und Basalt, von den *Sedimentgesteinen* Sand-, Kalksteine und Grauwacken und von den *Metamorphiten* Gneise bautechnisch wichtig.

Keramische Baustoffe. Nach Aussehen, Verwendungszweck und Aufbereitung der Rohstoffe unterscheidet man Grob- und Feinkeramik (vgl. Tab. 6.2.0-1). Zur Herstellung der feinkeramischen Erzeugnisse dienen hochwertige Rohstoffe, die sorgfältig aufbereitet werden, während man sich bei der Grobkeramik mit einer Grobaufbereitung begnügt. Bis zur Sinterung gebrannte Erzeugnisse zeichnen sich durch einen glasigen Scherben aus, der hohe Druck- und Abriebfestigkeit sowie gute Wetter- und Säurebeständigkeit gewährleistet. Der bei niedrigeren Temperaturen gebrannte poröse Scherben weist dagegen geringes Wärmeleitvermögen und gute Glasurhaftung auf (vgl. 5.2.).

Bauglas. Glas ist heute ein unentbehrlicher, vielfältig eingesetzter Baustoff. Er tritt sowohl als verkleidendes, verhüllendes und trennendes als auch verbindendes, die Übersicht förderndes, auch dekorativ wirkendes Baumaterial auf. Der anorganische Werkstoff Glas ist witterungsbeständig, korrosionsfest, unentflammbar und unbrennbar, besitzt große Härte und hohe Druckfestigkeit sowie in weiten Grenzen zu variierende Lichtdurchlässigkeit und Durchsichtigkeit (vgl. 6.3.). Nach den Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren und den dadurch bedingten unterschiedlichen Eigenschaften kann Bauglas in verschiedene Gruppen eingeteilt werden (Tab. 15.2.1-2).

Hervorzuheben sind die zunehmende Verwendung von Flachglas (Farb-, Opak-, Spiegelglas) mit Leichtmetall oder Holz für die Fassadengestaltung sowie von Glasfasern für Verbundwerkstoffe, wie glasfaserverstärktes Polyester (GUP). Neuere Entwicklungen in der Glasindustrie haben die Verfestigung des Glases durch gesteuerte Kristallisation (*Vitrokeramik*, vgl. 6.3.4.) oder die Verbesserung der elastischen Eigenschaften, z. B. durch Kombination mit einem Plast, zum Ziel.

Tab. 15.2.1-1 *Rohstoffe und ihre Verwendung in der Baumaterialienindustrie*

Rohstoff	Baumaterial
Eruptiv-, Sedimentgesteine und Metamorphite	Werksteine
Tongesteine	fein- und grobkeramische Erzeugnisse, Leichtzuschlagstoffe
Kalk, Gips-, Anhydrit- und Tongesteine	nichthydraulische und hydraulische Bindemittel
Sande, Kiese, gebrochene Natursteine	Betonzuschlagstoffe, Silikatbetone, Straßenbaustoffe
Kalk, Dolomit, Sand	Bauglas
Basalt, Asbest	Faserbaustoffe

Tab. 15.2.1-2 *Bauglaserzeugnisse und ihre Verwendung*

Gruppe	Glasarten	Verwendung
Tafelglas	Fenster-, Dickglas	Bauverglasung aller Art
Gußglas	Roh-, Ornament-, Draht-, Drahtornamentglas	großflächige, undurchsichtige Verglasungen
Spiegelglas	Spiegel-, Spiegelmatt-, Drahtspiegelglas	Verglasung von Schaufenstern und repräsentativen Bauten, Innenausbau
Farbenflachglas	durchsichtiges Farbglas, Überfangglas, Trübglas	Glasbeläge und -verkleidungen, Schmuckverglasungen
Sicherheitsglas	vorgespanntes Glas, Verbundglas	Verglasungen hoher Sicherheit
Wärmeschutzglas	Mehrscheiben-, Filtergläser	Verglasungen mit hohen Anforderungen an den Wärmeschutz
Profilglas	Well- und Welldrahtglas, [-förmige und sonstige Glasbauelemente, Glasrohre	konstruktive Zwecke, wie großflächige sprossenlose Verglasungen
Glasbausteine	Voll-, Hohl-, Lüftungssteine	lichtdurchlässige Wände
Betongläser	Glasbetonsteine für ebene und gewölbte Konstruktionen	begehbare, lichtdurchlässige Decken und Dächer
Glasfasererzeugnisse	Glasfasern, -seide, -watte, -wolle	Wärmedämmstoff, Verbundbaustoffe
Schaumglas		Wärmedämmstoff

Bindemittel. Die aus Steinen und Erden – z. T. unter Verwendung industrieller Abprodukte – hergestellten Bindemittel sind pulverförmige Stoffe, die mit einer Flüssigkeit, fast ausnahmslos Wasser, zu einem plastischen oder flüssigen Brei angemacht werden und dann aufgrund chemischer Vorgänge erhärten. Der Bindemittelleim geht dadurch in einen steinig festen Zustand über und verkittet die ihm beigegebenen Zuschlagstoffe. Nach der Wasserbeständigkeit der Erhärtungsprodukte unterscheidet man hy-

draulische und nichthydraulische Bindemittel (Tab. 15.2.1-3) (vgl. 6.1.).

15.2.2. Mörtel und Beton

Mörtel aus mineralischen Bindemitteln und feinkörnigen Zuschlagstoffen werden vorwiegend als *Fugenmörtel* für Mauerwerk, zum Putzen von Wand- und Deckenflächen sowie für die Herstellung von Estrichen verwendet (*Mauer-*, *Putz-* und *Estrichmörtel*, vgl. 15.5.1., 15.5.2. und 15.8.3.). Hierzu kommen zahlreiche spezielle Anwendungsgebiete, wie Ausfüllen von Rissen und Hohlräumen (*Injektionsmörtel*) oder Schließen von Spannkanälen in Spannbetonbauteilen (*Einpreßmörtel*, vgl. 15.6.2.).
Nach der Art der Bindemittel sind *Zement-*, *Kalk-Zement-*, *Kalk-*, *Mischbinder-*, *Gips-*, *Anhydritbinder-* und *Magnesiamörtel* zu unterscheiden. Als Zuschlagstoff wird in der Regel *Mörtelsand* eingesetzt. Estrichmörteln wird häufig zur besseren Wärmedämmung organischer Füllstoff beigemischt (vgl. 15.8.3.).
Schwerbeton. Bei den meisten Anwendungsgebieten des Betons stehen die Anforderungen an die Festigkeit, Dichte und Beständigkeit im Vordergrund. In solchen Fällen eignet sich der Normal- oder Schwerbeton, dessen Rohdichte zwischen 1900 und 2800 kg/m^3 liegt, am besten. Seine Eigenschaften hängen vor allem von der Güte und dem Anteil des Bindemittels Zement, von der Kornform, Oberflächenbeschaffenheit und Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe, von der Anmachwassermenge sowie der Verdichtung und Nachbehandlung des frischen Betons ab. Das Ziel der *Schwerbetontechnologie* besteht dabei immer darin, den Beton so zusammenzusetzen, daß er bei möglichst niedrigem Wasserzusatz vollkommen verdichtet werden kann (vgl. 15.6.1. und 15.6.3.).
Schwerbetonzuschlagstoffe müssen eine hohe Eigenfestigkeit haben und eine gute Verbindung mit dem Zementstein gewährleisten und dürfen keine Bestandteile enthalten, die die Erhärtung des Bindemittels beeinträchtigen. Gut geeignet sind vor allem *Sande* und *Kiese*. Daneben werden auch zerkleinerte, dichte Erstarrungsgesteine als *Brechsand*, *Splitt*, *Schotter* und *Steinschlag* verwendet. Auch genügend feste Sediment- und Umwandlungsgesteine eignen sich für diesen Zweck.
Wegen der vielfältigen Möglichkeiten, die Eigenschaften des *Frischbetons* während der Verarbeitung oder des *Festbetons* nach dem Erhärten zu verbessern, gewinnen in der modernen Betontechnologie *Betonzusatzmittel* immer mehr Bedeutung. Die wichtigsten sind *Betonverflüssiger*, *Dichtungsmittel*, *Erhärtungsbeschleuniger* und *-verzögerer*, *Frostschutzmittel* und *Luftporenbildner*.
Plastbetone werden als *reine Plastbetone* mit Duroplasten, wie Epoxidharz, Polyesterharz

u. a., als Bindemittel und als *Plastzementbetone* mit Zusatz von Thermoplasten (PVAc u. a.) hergestellt. Bei den *polymerimprägnierten Betonen* werden die Poren des Zementbetons mit Monomeren, wie Methylmethakrylat, Styrol u. a., getränkt und dieses dann z. B. durch Bestrahlung polymerisiert. Die Plastbetone zeichnen sich gegenüber den Zementbetonen durch höhere Festigkeiten und größere Beständigkeit aus.

Tab. 15.2.1-3 *Arten der Bindemittel und ihre Anwendung*

Bindemittelgruppe	Art	Hauptanwendungsgebiet
Hydraulische Bindemittel		
Zemente	Portlandzement	hochwertige, feingliedrige Bauteile aus Beton, Stahl- und Spannbeton
	Portlandzement mit Zumahlstoffen	Beton- und Stahlbetonbauteile mittlerer Güte
	Zement mit Zumahlstoffen	Massenbeton, Betone, bei denen es nicht auf hohe Anfangsfestigkeit ankommt
	sulfatbeständiger Portlandzement	Gründungen in sulfathaltigen Wässern und Böden, Betonstraßen und Asbestzementerzeugnisse
	Puzzolanzement	Massenbetone, Fundamente, Wirtschaftswege
Mischbinder		Betone geringer Festigkeit, Mauer- und Putzmörtel
Hydraulische Kalke	wasserhärtendes Kalkhydrat	Mauer- und Putzmörtel
Nichthydraulische Bindemittel		
Luftkalke	Branntkalk	porige und dichte Silikatbetone
	lufthärtendes Kalkhydrat	Mauer- und Putzmörtel
	Karbidkalkhydrat	
Gipse	Stuckgips	Stuckarbeiten, Gipsbauelemente, Gipskartonplatten, Zusatz zu Kalkputzmörtel
	Putzgips	Putzmörtel
	Alaungipsbinder	Verfugen von Fliesen, Kunstmarmor
Anhydritbinder	Anhydritbinder aus natürlichem und synthetischem Anhydrit	Mauer- und Putzmörtel, Estriche und Bauelemente
	Porenanhydritbinder	Wandplatten, Handmontagesteine

Leichtbetone sind porige Betone, die nach ihrer Verwendung in 3 Gruppen eingeteilt werden. *Wärmedämmende Betone* (Rohdichte 0,8 bis 1,10 kg/dm³, Druckfestigkeit 2,5 bis 3,5 N/mm²) und *konstruktiv-wärmedämmende Leichtbetone* (0,8 bis 1,6 kg/dm³, 3,0 bis 9,0 N/mm²) werden als *Leichtzuschlagbetone* vor allem im Hochbau für Zwecke eingesetzt, bei denen die *Wärmedämmfähigkeit* im Vordergrund steht. Die zur Herstellung dieser Betone verwendeten *Leichtzuschlagstoffe* sind in der Regel porige mineralische Stoffe, wie Natur-, Hüttenbims, Blähtone, Blähschiefer, Aschensinter, Ziegelsplitt und Feuerungschlacke. Durch eine zweckmäßige Kornzusammensetzung und die Beschränkung des Zementgehalts läßt sich erreichen, daß die Zuschlagstoffe nur punktweise durch den Zementstein verkittet sind. Zu der *Eigenporigkeit* der Zuschlagstoffe kommt dann noch die *Haufwerksporigkeit* des Betongefüges. Durch ein besonders günstiges Verhältnis von Druckfestigkeit zur Rohdichte zeichnen sich die im Autoklaven bei Drücken von 1,2 bis 1,6 MPa und Temperaturen von 180 bis 200 °C gehärteten *Porenbetone* aus. Sie werden aus auf Zementfeinheit vermahlenem Quarzsand, Kalk und geringen Mengen von Zement, unter Zusatz von Aluminiumpulver als Treibmittel, hergestellt (*Gassilikatbeton*, z. B. „Silton"®). Die mit Schaumbildnern hergestellten *Schaumbetone* weisen verfahrenstechnische Nachteile auf und besitzen wesentlich geringere Bedeutung. Porenbetone werden fast ausschließlich als konstruktiv-wärmedämmender Leichtbeton (0,6 bis 1,6 kg/dm³, 5 bis 15 N/mm²) in Form von Handmontagesteinen oder großformatigen Wand- und Dachplatten eingesetzt.

Konstruktive Leichtbetone haben keine Wärmedämmaufgaben zu erfüllen. Es sind gefügedichte Betone hoher Druckfestigkeit (1,3 bis 1,8 kg/dm³, 12 bis 35 N/mm²), die nur deshalb mit porigen Zuschlagstoffen hergestellt werden, um die Rohdichte zu senken und die Masse der Bauteile zu verringern.

15.2.3. Baumetalle

Stahl und Gußeisen. Aus wirtschaftlichen Gründen werden im Bauwesen als Konstruktionswerkstoffe in der Regel *unlegierte* oder allenfalls *leicht legierte Massenbaustähle* verwendet. Die größte Bedeutung kommt dabei dem St 38 und dem St 52 zu. *Legierte Stähle* werden i. allg. nur für spezielle Bauaufgaben eingesetzt. So werden *hochfeste Stähle* mit relativ hoher Streckgrenze, z. B. St 45/60, bei hochbeanspruchten Konstruktionen oder solchen, bei denen die Verringerung der Eigenmasse große Vorteile bringt, verwendet. *Korrosionsträge Stähle* werden vor allem bei witterungsbeanspruchten Bauteilen und im Stahlleichtbau vorgesehen. *Gußeisen* und *Stahlguß* eignen sich in erster Linie für Bauteile, die nur auf Druck beansprucht sind, wie Auflager im Hoch- und Brückenbau, Gelenke, sowie für Kupplungen von Rohrgerüsten, Fittings und Beschlagteile.

Leichtmetalle. Die im Verhältnis zur geringen Dichte hohen Festigkeiten des *Aluminiums* und seiner Legierungen begründen die gute Eignung dieser Werkstoffe für Leichtbauweisen. Gute Beständigkeit gegen Korrosion und die mannigfachen Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung erschließen darüber hinaus viele Anwendungsgebiete im Ausbau. Als Baustoff für tragende Konstruktionen im Ingenieurbau werden die Legierungen AlCuMg (400 bis 440 N/mm²) sowie AlMgSi und AlMg (180 bis 320 N/mm²) verwendet. Die hochfesten Legierungen AlCuMg und AlMgSi werden in der Regel im ausgehärteten Zustand geliefert; einen Teil ihrer hohen Festigkeit verdanken sie also einer Wärmebehandlung. Auch durch Kaltwalzen, -recken und -ziehen läßt sich die Festigkeit der Aluminiumwerkstoffe steigern. Bei der konstruktiven Durchbildung von Aluminiumbauteilen muß der niedrige Elastizitätsmodul berücksichtigt werden.

Schwere Nichteisenmetalle. Die Verwendung von *Kupfer*, *Blei* und *Zink* im Bauwesen ist durch Anwendungsverbote sehr stark eingeschränkt. Vor allem in den Plasten stehen Substitutionswerkstoffe zur Verfügung, die den Buntmetallen häufig technisch und ökonomisch überlegen sind. Während deshalb Blei und Kupfer nur für sehr spezielle Aufgaben eingesetzt werden, z. B. Blei als Strahlenschutz und Kupfer bei der Reparatur von historischen Bauten, wird Zink wegen seiner Witterungsbeständigkeit in Form von Blechen vor allem in der Dachentwässerung in größerem Umfange verwendet. Außerdem besitzt es für das Verzinken von Stahlkonstruktionen und -blechen sowie Kleineisenteilen erhebliche Bedeutung.

15.2.4. Holz und Faserbaustoffe

Die wertvollen technischen Eigenschaften des *Holzes* machen diesen Werkstoff auch heute noch zu einem geschätzten Baumaterial. Allerdings zwingt der Bedarf vieler anderer Industriezweige, die auf das Holz nicht verzichten können, zu weitgehender Einsparung im Bauwesen. Zur Substitution von Holz sind auf vielen Gebieten die ihm nachentwickelten *Faserbaustoffe*, vor allem die mittelschweren, gut geeignet (vgl. 7.3.).

Bauholz. Aufgrund seiner im Verhältnis zur niedrigen Rohdichte hohen Festigkeit, seiner Elastizität und leichten Bearbeitbarkeit, seines niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und seiner guten Beständigkeit gegen Säuren und

Salze u. a. wird Holz nach wie vor als wirtschaftlicher Baustoff für spezielle Bauaufgaben verwendet. Beispiele hierfür sind auf Biegung beanspruchte Tragwerke, bei denen das Verhältnis von Verkehrslast zu Eigenmasse klein ist, wie bei Hallenbindern, in kürzester Frist zu errichtende Bauwerke und der Gerüstbau (vgl. 15.4.). Von den harten Hölzern werden Eiche und Buche, von den mittelharten Kiefer, Lärche und Erle und von den weichen Fichte und Tanne als Bauholz verwendet. In der Regel wird dieses als *Schnittholz* in Form von Kantholz, Brettern, Bohlen und Latten, bei Gerüsten auch als *Rundholz* in Form von Stangen und Stämmen eingesetzt. Nach seiner Tragfähigkeit wird Bauholz in 3 Güteklassen eingeteilt. Für das am meisten verwendete Nadelholz der Güteklasse II, Bauschnittholz mit gewöhnlicher Tragfähigkeit, gelten als zulässige Spannungen: Biegung 10 N/mm^2, Zug und Druck in Faserrichtung 8,5 N/mm^2, Druck quer zur Faserrichtung 2 N/mm^2, Abscheren in Faserrichtung 0,9 N/mm^2. Bei Beanspruchungen parallel zur Faserrichtung kann mit einem Elastizitätsmodul von 10^4 N/mm^2, quer zur Faserrichtung dagegen nur mit 300 N/mm^2 gerechnet werden. Mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt des Holzes verschlechtern sich die Festigkeitseigenschaften (vgl. 7.1.3.). *Lagenholz* (aus mehreren Furnierlagen bestehend), *Spanplatten*, *Faserplatten*, *Holzwolle-Leichtbauplatten* (vgl. 7.3.4.) und *Verbundplatten* (vgl. 7.3.) haben vor allem für den bautechnischen Ausbau Bedeutung.

Anorganische Faserbaustoffe zeichnen sich gegenüber den Holzwerkstoffen durch gute Verrottungsbeständigkeit und Unbrennbarkeit aus und sind deshalb als Austauschwerkstoff besonders gut geeignet. Ihre Eigenschaften hängen entscheidend davon ab, ob es sich um schwere, mittelschwere oder leichte Faserbaustoffe handelt. Der wichtigste Vertreter der *schweren, dichten Faserbaustoffe* ist der *Asbestzement*, der aus aufbereiteten Asbestfasern und Zement besteht, sich durch hohe Wetterbeständigkeit, Biegefestigkeit, Wasserundurchlässigkeit, Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit auszeichnet und zu ebenen Platten, Wellplatten, Rohren und Formstücken verarbeitet wird. Hauptanwendungsgebiete sind Dach- und Wanddeckungen, Be- und Entlüftungsrohre, Dachrinnen, Regenfallrohre und Druckrohre. Die *mittelschweren Faserbaustoffe* entsprechen in Rohdichte und Festigkeiten etwa dem Holz. Zu ihrer Herstellung werden neben anorganischen Fasern und Bindemitteln auch organische verwendet („Sokalith", „Geronit", Hartfaserplatten u. a.). Die *leichten Faserbaustoffe* umfassen neben den porigen Holzspan-, Holzfaser- und Fußbodendämmplatten auch die Glas- (vgl. 6.3.4.) und Mineralfasern, die lose, in Form von Matten und Bahnen, oder mit Plastbindung, in Form von Platten und Rohschalen, für Wärmedämmzwecke verwendet werden.

15.2.5. Bituminöse Baustoffe

Bitumina sind hochmolekulare, kolloidale Gemische von Kohlenwasserstoffen, die in einem breiten Temperaturbereich plastisch und dehnbar sind. In der Natur treten sie in Gesellschaft von lösenden oder verteilenden Stoffen, wie Erdöl, oder stützenden Mineralen, wie Asphalte und Asphaltgesteine, auf. Sie werden durch fraktionierte Destillation oder durch Ausschmelzen gewonnen. Die aus Roherdölen durch Destillation erhaltenen *Destillationsbitumina* sind weiche bis mittelharte Sorten, die nach der Eindringtiefe einer Prüfnadel klassifiziert werden. Wegen der in ihnen noch enthaltenen Öle reicht ihre Klebefreiheit vor allem im Bautenschutz häufig nicht aus. Bei den durch Destillation im Vakuum gewonnenen *Hochvakuumbitumina* tritt dieser Nachteil nicht auf. Durch Einblasen von Luft in geschmolzene weiche Destillationsbitumina bei Temperaturen von ≈ 300 °C entstehen *geblasene Bitumina*. Sie zeichnen sich vor allem durch eine größere Plastizitätsspanne aus. Bei Raumtemperatur sind Bitumina meist halbfest bis hart. Erwärmt man sie, werden sie zunächst knetbar weich und bei 150 bis 200 °C dünnflüssig. Im flüssig-hochplastischen Zustand sind Bitumina sehr klebefähig, so daß sie als Überzüge und Kleber gut geeignet sind. Ausgeprägte Elastizität, hohe Wasserfestigkeit und -dichtigkeit sowie gute chemische Beständigkeit machen die Bitumina zu einem wertvollen Werkstoff für den Bautenschutz. Für die Verarbeitung ist es günstig, daß die Bitumina gute Streich- und Spritzbarkeit sowie ausgezeichnete Haftfestigkeit haben.

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Bitumina sind Bindemittel für Bodenbeläge, insbesondere im Straßenbau, Kleb-, Anstrich-, Spachtel- und Vergußstoffe sowie Dichtungsmittel für Mörtel und Beton.

Teere und **Peche** ähneln in physikalischer und chemischer Hinsicht weitgehend den Bitumina. *Teere* sind die Anfallprodukte der zersetzenden Destillation organischer Stoffe, insbesondere der Kohle. Gegenüber den Bitumina zeichnen sich *Steinkohlenteere* und *-peche* durch besonders gute Haftung und besseres Eindringvermögen in den Untergrund aus; allerdings ist ihre plastische Spanne wesentlich kleiner. Ihre Verwendung entspricht etwa der der Bitumina. *Braunkohlenteere* und *-peche* sind insbesondere wegen ihres hohen Gehalts an Paraffin erst nach Aufarbeitung brauchbar; auch dann ist aber die Wasser-, Temperatur- und Wetterbeständigkeit viel geringer als die von Steinkohlenteeren und -pechen und Bitumina.

Dachpappen — Dichtungsbahnen. Die für Dacheindeckungen verwendeten *Dachpappen* sowie die zum Absperren bzw. Abdichten gegen Was-

ser benutzten *Dichtungsbahnen* sind bahnenförmige Erzeugnisse aus einem Träger, meist *Rohdachpappe* und *Wollfilzpappe*, seltener Gewebe, die mit Bitumen oder Steinkohlenteer getränkt und meist auch ein- oder beidseitig mit einer butiminösen Deckschicht versehen und besandet sind. Nach der Dicke unterscheidet man 333er und 500er Dachpappe; die Zahlen geben die Masse der Rohdachpappe in g/m^2 an.

15.2.6. Plaste und Elaste

Plaste und *Elaste* haben sich aufgrund ihrer guten Eigenschaften (vgl. 5.1. und 5.2.) auch im Bauwesen einen festen Platz gesichert. Ihre niedrige Dichte, geringe Wärmeleitfähigkeit, guten mechanischen Eigenschaften, die durch geeignete Füllstoffe, wie Glasfasern, noch weiter verbessert werden können, ihre dichte Oberfläche, durch die sie gebrauchsbeständig und widerstandsfähig gegen chemische Angriffe sind, u. a. Vorzüge, wie die plastische Formbarkeit, machen sie vor allem für die Verwendung im Ausbau und im Bautenschutz sehr wertvoll. Einschränkungen der Anwendung im Bauwesen ergeben sich aus der Brennbarkeit, der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Temperatur und der Neigung zum Altern beim Einsatz im Freien. Anwendungsbeispiele für Plaste im Bauwesen vgl. Tab. 5.1.3-1.

15.2.7. Sonstige Baustoffe

Unter diesem Begriff werden einige Baustoffe zusammengefaßt, die dem Schutz und der Ausschmückung der Bauwerke dienen.

Sperrstoffe schützen Gebäude gegen eindringende Feuchtigkeit. *Sperranstrichmittel* bestehen meist aus Bitumen oder Teer und werden in Form von heißflüssigen Massen, Lösungen oder Emulsionen verarbeitet. Für dickere Sperrschichten verwendet man Spachtelmassen. *Sperrzusätze* (Dichtungsmittel) sind porenfüllende Stoffe, z. B. Gesteinsmehle, oder Chemikalien mit wasserabweisender Wirkung, z. B. Metallseifen, Silikone, die Mörtel oder Beton zugegeben werden, um die Wasserdichtigkeit zu erhöhen.

Dämmstoffe. *Wärmedämmstoffe* sollen die Fortleitung der Wärme hindern und haben geringe Wärmeleitfähigkeit. Baustoffe sind umso besser wärmedämmend, je feinporiger und trockner sie sind. Gute Wärmedämmstoffe sind Mineralfasern, z. B. „Kamilith", Plastschäume, wie Polystyrol- und Polyurethanschaum, und Schaumglas.

Schalldämmstoffe dienen der Verhinderung der Schallausbreitung in Gebäuden. Stoffe, die gegen alle Arten des Schalls dämmend wirken, gibt es nicht. Gegen *Luftschall* dämmen dicke, schwere und auch mehrschalige Konstruktionen mit biegeweicher Oberschicht. Dämmstoffe für *Körperschall* sind dagegen federnde Stoffe, wie Schichten aus Mineralfasern, Glasfasern oder Schlackenwolle sowie Schüttungen aus Gummischrot. Zur Dämpfung des *Trittschalls* dienen weiche Fußbodenbeläge oder elastische Zwischenschichten zwischen Decke und Belag. *Schallschluckstoffe* verhindern die Reflektion von Schallwellen. Dazu eignen sich poröse Stoffe, wie Plastschäume, Glas- oder Mineralfasermatten.

Anstrichstoffe sind flüssige oder pastenförmige Produkte, die auf einem Untergrund aufgebracht werden, um ihm einen Schutz gegen äußere Einflüsse zu verleihen oder sein Aussehen zu verbessern (vgl. 4.12.3.).

Klebstoffe, Kitte und Spachtelmassen sind Baustoffgemenge, die zum adhäsiven und kohäsiven Fügen (Klebstoffe) und zum adhäsiven und kohäsiven Glätten von Bauteilen (Kitte und Spachtelmassen) bestimmt sind. *Klebstoffe* sind meist organische Stoffgemenge, mit denen Bauteile verbunden werden. *Kitte* sind plastische Massen aus einem Bindemittel und Füllstoffen und werden zum Ausfüllen von Rissen, Löchern und Unebenheiten sowie zum Dichten von Fugen verwendet. *Spachtelmassen* sind poröse Anstrichstoffe, die zum Ausgleich von kleineren Unebenheiten und zum Glätten des Untergrunds dienen.

15.3. Grund- und Erdbau

15.3.1. Der Boden als Baugrund

Man unterscheidet zwischen *Festgesteinen* und den durch Verwitterung entstandenen *Lockergesteinen*. Letztere können als *Residualböden* an ihrem Entstehungsort liegen oder durch Wasser, Eis und Wind verfrachtet und an anderer Stelle als *Sedimente* abgelagert sein. Unter besonderen Bedingungen werden diese Ablagerungen durch Verkittung, z. B. *Sandstein*, oder Druck, z. B. *Tonschiefer*, wieder verfestigt.

Die Beschreibung der Festgesteine und die Feststellung ihrer Festigkeitseigenschaften ist Sache der Geologie, die Beschreibung der Lockergesteine und die Bestimmung ihrer physikalischen Eigenschaften dagegen Aufgabe der *Bodenmechanik*, eines Teilgebiets der Bautechnik.

Bautechnische Einteilung der Bodenarten. Nach der Korngröße unterscheidet man die 4 Hauptarten *Kies*, *Sand*, *Schluff* und *Ton*. Durch Sieben und Schlämmen wird für jede einzelne Bodenprobe die betreffende Kornverteilungskurve ermittelt (Abb. 15.3.1-1). Nach den phy-

sikalischen Eigenschaften unterscheidet man *nichtbindige Böden*, wie Sand, Kies, Grobschluff, und *bindige Böden*, wie Ton, Lehm, lehmiger Sand und Kies, Mergel, toniger Schluff. Hinzu kommen organisch durchsetzte Böden, wie Kohle, Torf, Schlick, Klei, Humus. *Lehm* ist ein Gemenge von 30 bis 70 % Ton und 70 bis 30 % Sand, *Mergel* ist kalkhaltiger, meist mit Sand vermischter Ton und *Löß* ein vom Wind abgelagertes, kalkhaltiges Sediment. Nichtbindige Böden haben keine Bindung zwischen den einzelnen Körnern, so daß bei deren Bewegung gegeneinander nur die Reibung zu überwinden ist. Die Tragfähigkeit hängt maßgeblich von der Lagerungsdichte der Körner ab und wird durch den Wassergehalt nicht beeinflußt.

In bindigen Böden ist zwischen den einzelnen Körnern eine Bindung, die Haftfestigkeit, physikalischer, chemischer oder elektrischer Natur vorhanden. Wegen der kleinen Korndurchmesser bilden die Hohlräume zwischen den Körnern enge Kapillarröhren. Daher ist die Wasserdurchlässigkeit bindiger Böden sehr gering und ihre Frostempfindlichkeit groß. Die Festigkeit bindiger Böden wird ausschlaggebend von der Höhe des Wassergehalts beeinflußt.

Baugrunderkundung und -untersuchung. Ziel der *Baugrunderkundung* ist, Art und Beschaffenheit der anstehenden Erdarten, Mächtigkeit, Folge und Verlauf der Schichten sowie Vorhandensein und Höhenlage von Grundwasser festzustellen.

Schürfgruben ermöglichen, die anstehenden Schichten unmittelbar in Augenschein zu nehmen, sind aber nur oberhalb des Grundwassers und bis zu verhältnismäßig geringer Tiefe anwendbar. *Bohrlöcher* sind die gebräuchlichste Art der Baugrunderkundung. Mit ihnen sind der Aufschluß des Baugrunds und die Entnahme von Bodenproben bis zu jeder bautechnisch interessierenden Tiefe möglich (vgl. 1.1.2.). *Sondierungen* sind sog. indirekte Aufschlüsse, bei denen ein Stahlstab durch Rammen oder Drehen in den Untergrund eingetrieben wird. Aus dem Verhältnis der aufgewendeten Energie zum Fortschritt des Eindringens wird auf die Festigkeitseigenschaften der durchfahrenen Erdschicht geschlossen.

Für großräumige Untersuchungen des Baugrunds sind auch geophysikalische Methoden, vor allem die Elektro- und Seismometrie (vgl. 1.1.1.) sowie dynamische Verfahren geeignet. Die Eigenschaften der Bodenarten werden durch Untersuchungen im Feld und im Labor festgestellt. Zu den *Felduntersuchungen* gehören Probebelastungen, Plattendruckversuche sowie radiometrische Messungen der Dichte und des Wassergehalts der anstehenden Bodenart. Die *Laboratoriumsuntersuchungen* sind vor allem auf die Feststellung der Zusammendrückbarkeit, der Scherfestigkeit und der Wasserdurchlässigkeit des Bodens gerichtet.

Verhalten des Bodens unter Belastung. Der Boden besteht aus Körnern und den zwischen diesen eingeschlossenen Hohlräumen, den Poren, die mit Luft oder Wasser ausgefüllt sind. Bei der Belastung durch ein Bauwerk wird der Boden zusammengedrückt, wobei das Porenvolumen verringert wird und sich eine dichtere Lagerung der Körner einstellt. Dieser Vorgang wird als *Setzung* bezeichnet, wobei ungleichmäßige Setzungen besonders gefährlich sind (s. u.). Das Maß der Setzung hängt in erster Linie von der Bodenart und der anfänglichen Lagerungsdichte des Bodens und der Größe der Belastung ab. Der Druck, den eine Belastung auf den Untergrund ausübt, verteilt sich geradlinig nach allen Seiten,

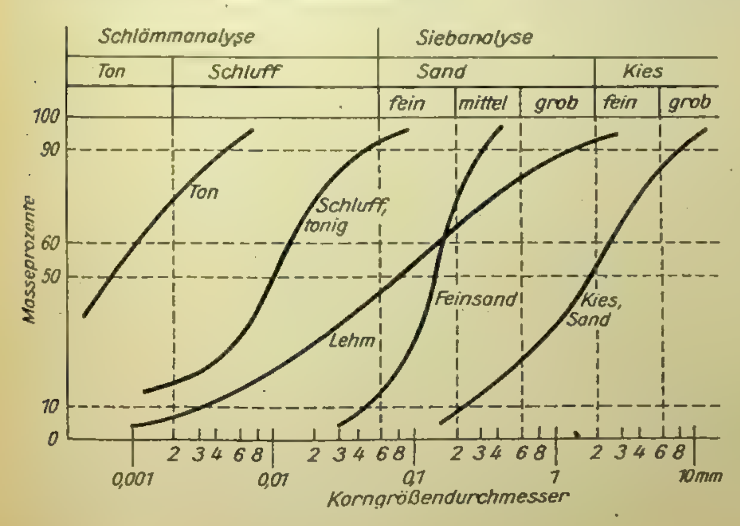


Abb. 15.3.1-1 Kornverteilungsstufen

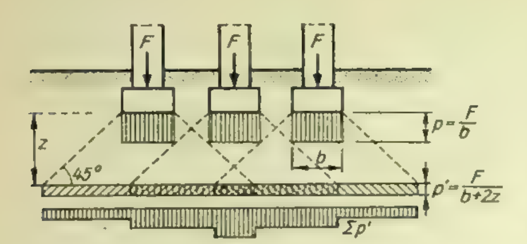


Abb. 15.3.1-2 Spannungsverteilung im Untergrund unter benachbarten Streifenfundamenten (vereinfachte Darstellung)

d. h. mit zunehmender Tiefe wird die durch Druck beanspruchte Fläche immer größer, und die Druckspannung je Flächeneinheit nimmt mit der Tiefe entsprechend ab.
Die Spannungsflächen unter Fundamenten von benachbarten Bauwerken oder Bauwerksabschnitten überlagern sich (Abb. 15.3.1-2). An diesen Überlagerungsstellen ergeben sich größere Setzungen, so daß sich benachbarte Bauwerke zueinander neigen oder sich die Mitte eines langgestreckten Gebäudes mehr setzt als seine Ränder. Setzungen können außer durch statische Belastung auch durch Erschütterungen, Veränderungen des Grundwasserspiegels, unterirdische Auslaugungen, bergbauliche Maßnahmen, Frosteinwirkungen u. ä. hervorgerufen werden.
Überschreitet die Belastung des Bodens seine Festigkeit, so tritt ein *statischer Grundbruch* ein, d. h. der Boden wird seitlich neben dem Fundament hochgedrückt und wölbt sich auf, wobei das Bauwerk einsinkt.
Die Gründung eines Bauwerks muß so entworfen werden, daß Setzungen eine für das Bauwerk unschädliche Größe nicht überschreiten und der Boden nur so weit belastet wird, daß kein Grundbruch auftritt.

15.3.2. Grundbau

Aufgabe der Gründung ist, die Eigen- und Nutzlast des Bauwerks so auf den Baugrund zu übertragen, daß das Bauwerk ausreichend gegen Versinken, Kippen und Gleiten gesichert ist und die auftretenden Setzungen innerhalb einer Größenordnung bleiben, bei der Bestand und Nutzung des Bauwerks nicht beeinträchtigt werden.
Flachgründungen sind die technisch und wirtschaftlich günstigste Gründungsart, wenn ein tragfähiger Baugrund in der Nähe der Geländeoberfläche ansteht. Ihre Formen sind *Einzelfundamente* unter Säulen und Pfeilern, *Streifenfundamente* unter Mauern und Säulenreihen, *Fundamentplatten* für ganze Gebäude oder Gebäudeteile bei hohen Gebäudelasten oder bei flächenhaften Bauwerken, z. B. Behältern, oder für Wannen bei Grundwasserabdichtung.
Einzel- und Streifenfundamente aus Stampfbeton oder Mauerwerk sind im Querschnitt abgetreppt oder abgeschrägt. Fundamente aus Stahlbeton beanspruchen eine geringere Konstruktionshöhe und haben rechteckigen oder trapezförmigen Querschnitt (Abb. 15.3.2-1). Die verwendeten Baustoffe müssen eine den auftretenden Beanspruchungen entsprechende Festigkeit und gleichzeitig Beständigkeit gegen die chemische Aggressivität des Erdreichs und des Wassers aufweisen. Verwendet werden hauptsächlich Stampf- und Stahlbeton, daneben Mauerwerk aus künstlichen oder natürlichen Steinen. Bei starker Aggressivität werden die Fundamente durch Anstrich, Hautdichtung oder Verkleidung, z. B. mit Klinkermauerwerk, geschützt.
Flachgründungen müssen frostfrei – in unseren Breiten mindestens 0,8 m tief – liegen. Die *Gründungstiefe* ist außerdem abhängig von statischen Gesichtspunkten, von der Tiefenlage benachbarter Gründungen, vom Grundwasserstand und bei Wasserbauten von der Auskolkungsgefahr.

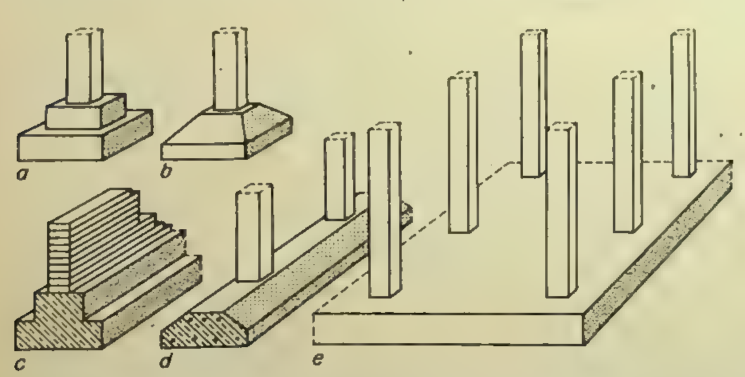


*Abb. 15.3.2-1 Flachgründungen: **a** Einzelfundament aus Stampfbeton und **b** aus Stahlbeton, **c** Streifenfundament unter einer Wand und **d** unter einer Stützenreihe, **e** Ausschnitt aus einer Fundamentplatte*

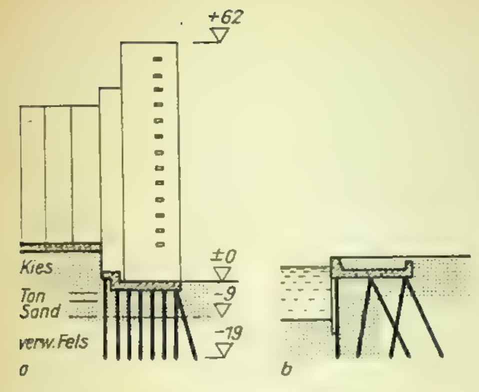


Abb. 15.3.2-2 *Pfahlgründung: a Silogebäude, b Kaimauer*

Tiefgründungen werden angewendet, wenn die tragfähige Schicht des Untergrunds nicht unmittelbar unter dem Bauwerk, sondern erst in größerer Tiefe ansteht.

Pfahlgründungen sind die älteste und weitestverbreitete Form der Tiefgründung. Hierbei wird die Last vom Pfahl durch Spitzendruck und Mantelreibung in die tragfähige Schicht übertragen. Die Pfähle werden entweder als vorgefertigte Pfähle (Fertigpfähle) in den Untergrund eingebracht oder an Ort und Stelle im Untergrund hergestellt (Ortpfähle) und gruppenweise an den Köpfen durch eine *Rostplatte* oder einen *Balkenrost* – meist aus Stahlbeton – zusammengefaßt (Abb. 15.3.2-2).

Fertigpfähle. Holzpfähle werden seit ältester Zeit für Gründungen verwendet. Viele historische Bauten stehen auf Holzpfählen, die ihre Festigkeit durch Jahrhunderte behalten, wenn sie dauernd unterhalb des Wasserspiegels bleiben. Heute werden sie für Dauerbauten kaum noch angewendet.

Schlaff bewehrte *Stahlbetonpfähle* haben meist quadratischen Querschnitt bis zu 400 mm Kantenlänge und eine größte Länge von 22 m. *Spannbetonpfähle* besitzen in der Regel kreisförmigen oder quadratischen Hohlquerschnitt und können Längen von ≈ 60 m erreichen. *Stahlpfähle* werden als Profilpfähle oder kreis- oder kastenförmige Hohlpfähle verwendet. Fertigpfähle werden in der Regel eingerammt – u. U. mit Spülhilfe –, bei geeignetem Untergrund auch eingerüttelt.

Ortpfähle entstehen, indem man einen ihren Abmessungen entsprechenden Hohlraum im Untergrund herstellt und ausbetoniert. Meist wird ein Mantelrohr durch Bohren, Rammen, Rütteln oder Drücken in den Untergrund eingetrieben. Beim Bohren ist das Rohr unten offen, und das Erdreich innerhalb des Rohrs wird ausgeräumt. Bei den anderen Verfahren ist das Rohr unten durch eine verlorene Spitze oder einen Betonpfropfen verschlossen und verdrängt das Erdreich (Abb. 15.3.2-3). Das Rohr wird in der Regel während des Betonierens wieder gezogen. Unter Verwendung einer Tonsuspension als Stützflüssigkeit im Bohrloch lassen sich Bohrpfähle auch ohne Verrohrung herstellen. Zur Vergrößerung der Aufstandsfläche können auf verschiedene Art – Schneiden, Sprengen, Ausrammen eines Hohlraums und Ausfüllen mit Beton – vergrößerte Pfahlfüße hergestellt werden.

Großbohrpfähle mit 800 bis 1 500 mm Durchmesser und bis ≈ 4 MN Gebrauchslast je Pfahl werden seit einigen Jahren zunehmend verwendet. In Europa wird i. allg. mit Verrohrung gebohrt und der Boden mit einem schweren

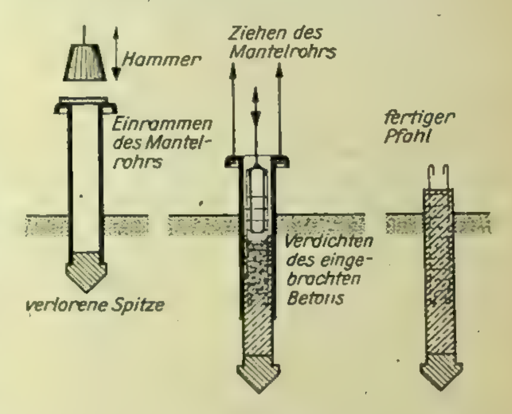


Abb. 15.3.2-3 *Ortpfahl*

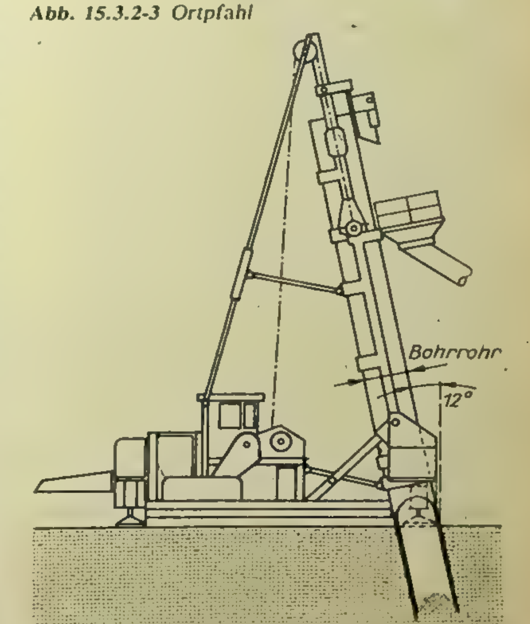


Abb. 15.3.2-4 *Benoto-Bohrpfahlgerät*

Einseilgreifer gelöst und gefördert (Verfahren von *Benoto* [Abb. 15.3.2-4], *Hochstraßer-Weise*, *Franki* u. a.). In standfesten Böden wird, besonders in den USA, ohne Verrohrung mit großen Teller- oder Schneckenbohrern gearbeitet. Die Sowjetunion ist führend in der Herstellung von Großbohrpfählen, bei denen in feinkörnigem, wassergesättigtem Untergrund ein Stahlbetonzylinder mit schwerem Aufsatzrüttler eingerüttelt, der Boden im Inneren ausgeräumt und der Absenkvorgang mitunter durch Spülen unterstützt wird. Großpfähle werden gegenwärtig oft anderen Tiefgründungen vorgezogen, weil ihre Herstellung weitgehend mechanisiert werden kann.

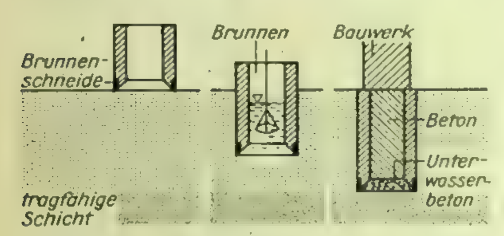


Abb. 15.3.2-5 Brunnengründung; während des Absenkens wird der Brunnen weiter aufbetoniert oder aufgemauert

Brunnengründungen. Brunnen (Abb. 15.3.2-5) sind oben und unten offene Hohlkörper, die infolge ihrer Eigenlast absinken, während die Erde in ihrem Innern durch Greifer oder Spülen entfernt wird. Die durchfahrenen Untergrundschichten müssen feinkörnig und frei von Hindernissen, wie z. B. Findlingen, Trümmern, Baumstämmen u. ä., sein. Der Absenkwiderstand kann herabgesetzt werden, indem man den Brunnen mit einem Mantel aus einer Tonsuspension umgibt. Die günstigste Querschnittsform ist der Kreis; in Anpassung an die Grundrißform des aufgehenden Bauwerks wählt man aber häufig eine andere Querschnittsform, z. B. Quadrat, Rechteck, Polygon, Ellipse. Brunnen werden in sehr verschiedener Größe – von 1 m Durchmesser bei Betonringen bis zu 100 m Seitenlänge, z. B. beim Nikkotsu International Building in Tokio – und bis zu großer Absenktiefe, z. B. 80 m bei der Gründung der Trans-Bay-Brigde in San Francisco, ausgeführt. Das untere Ende des Brunnens wird als Brunnenschneide, fast stets aus Stahl, ausgebildet. Ursprünglich wurden die Brunnen aus Mauerwerk, heute werden sie aus Stahlbeton oder als hohlwandige Stahlkonstruktion, die während des Absenkens ausbetoniert wird, ausgeführt. Der Brunnen wird, wenn möglich, an der Absenkstelle hergestellt. Dazu dient in offenem Wasser eine künstliche Insel oder ein Gerüst, von dem er nach Fertigstellung auf die Gewässersohle abgelassen wird. Bei großer Wassertiefe an der Absenkstelle wird der Brunnen auf einer Helling oder im Dock oder auf einem in flachem Wasser errichteten Gerüst gefertigt und dann eingeschwommen. Nach dem Absenken bis auf die tragfähige Schicht wird der Brunnen in ganzer Höhe oder nur im unteren Teil ausbetoniert.

Druckluftgründung (Abb. 15.3.2-6). Hierbei wird ein unten offener Senkkasten aus Stahlbeton oder Stahl verwendet und das Wasser aus der von ihm gebildeten Arbeitskammer mittels Druckluft durch die Kammersohle in den Gewässergrund ausgepreßt. Der in der Kammer herrschende Überdruck entspricht dem äußeren Wasserdruck. Die Verbindung zwischen Arbeitskammer und Außenluft wird durch ein Schachtrohr und eine Druckluftschleuse hergestellt, durch die Menschen und Material ein- und ausgeschleust werden, ohne daß der Überdruck in der Kammer verlorengeht. Der Kasten sinkt durch Freigraben der Schneide und unter Wirkung der Eigenlast des Kastens und des aufgehenden Bauwerks, z. B. eines Brückenpfeilers, ab. Das Bauwerk wird während des Absenkens laufend hochgeführt, so daß die Oberkante stets über der Wasserlinie bleibt. Druckluftsenkkästen werden in gleicher Weise wie Brunnen hergestellt. Vorteilhaft ist, daß in der Arbeitskammer auch Hindernisse im Untergrund beseitigt werden können und man den Baugrund in Augenschein nehmen kann. Nach Erreichen der endgültigen Tiefe wird die Arbeitskammer ausbetoniert, und der Kasten bildet den Grundkörper des Bauwerks. Mit Rücksicht auf den vom menschlichen Organismus ohne Schaden ertragbaren Überdruck ist die Absenktiefe auf max. 35 m unter dem Wasserspiegel beschränkt.

Schwimmkästen finden Verwendung als Gründungskörper, Kaimauern, Molen u. ä. Sie be-

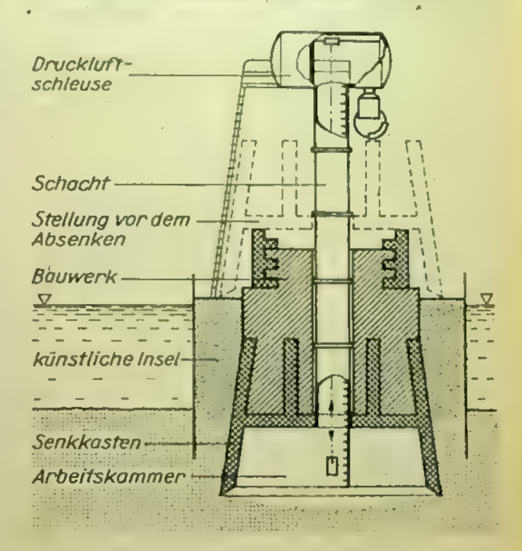


Abb. 15.3.2-6 Druckluftsenkkasten

stehen aus einer Grundplatte sowie Umfassungs- und Aussteifungswänden, werden meist aus Stahl- oder Spannbeton in einem Dock, auf einer Helling oder auf einem Gerüst hergestellt, zur Einbaustelle geschwommen und dort durch Einfüllen von Ballast (Beton, Sand, Wasser) auf eine vorher eingeebnete Sohle abgesenkt. Schwimmkästen eignen sich besonders für Gründungsarbeiten, die mit Rücksicht auf veränderliche Wasser- und Wetterbedingungen in kurzer Zeit ausgeführt werden müssen.

Schüttungen von natürlichen Steinen oder Betonblöcken dienen zur Herstellung von Dämmen, Molen (vgl. 15.10.7.) u. ä. sowie als Unterlagen für abgesenkte Gründungskörper in offenem Wasser.

Baugrundverbesserung. Ist die oberste Bodenschicht ungenügend tragfähig, so kann sie im *Bodenaustausch* durch eine gut verdichtete Sand- oder Kiesschicht ersetzt werden. Wenn die eingebaute Schicht druckverteilend wirkt und dadurch die Setzung vermindert, spricht man von einer *Polstergründung*. Anstehende locker gelagerte, nichtbindige Schichten können durch Tiefenrüttler mit gleichzeitiger Spülung bis in 30 m Tiefe verdichtet werden (*Rütteldruckverfahren, Hydrovibration, Vibroflotation*). Die *Oberflächenverdichtung* mit Walzen, Rüttelbohlen und Stampfgeräten hat nur begrenzte Tiefenwirkung und ist daher lediglich für den Einbau dünner Bodenlagen geeignet (vgl. 15.11.3.).

Injektionsverfahren dienen zur Abdichtung, aber auch zur Verfestigung. Von Bohrlöchern aus wird eine Suspension von Zement, Ton-Zement oder Ton, eine Chemikallösung (Wasserglas und Chlorkalziumlösung) oder eine Bitumenemulsion in den Untergrund eingepreßt.

Stützkonstruktionen. Die steilste Neigung, bei der eine Böschung im Lockergestein noch standfest ist, wird durch den *Böschungswinkel* bestimmt, der vom Reibungswinkel und der Haftfestigkeit des Lockergesteins abhängt. Geländesprünge, die steiler als der natürliche Böschungswinkel stehen sollen, müssen abgestützt werden. Der abgestützte Erdkörper übt auf die Stützkonstruktion eine Kraft, den *Erddruck*, aus. Die gebräuchlichsten Formen der Stützkonstruktionen sind *Stützmauern, Spundwände, Ortswände* und — für den Ausbau von Baugruben — *Bohlwände*.

Stützmauern werden in Stampfbeton oder Mauerwerk als *Schwergewichtsmauern* oder in Stahlbeton als *Winkelstützmauern* (Abb. 15.3.2-7) ausgebildet. Sie müssen so bemessen sein, daß sie gegen den angreifenden Erddruck ausreichend gleit- und kippsicher sind. Durch Anordnung von Sickerpackungen an der Rückseite und von Entwässerungsrohren ist zu verhindern, daß sich hinter der Mauer Stauwasser ansammelt.

Spundwände sind senkrechte, möglichst wasserdichte, teilweise oder ganz in den Untergrund durch Rammen, Rütteln und Spülen eingetriebene Wände. Sie bestehen aus einzelnen Spundbohlen aus Holz, Stahl, Stahl- oder Spannbeton, die durch Falze oder Schlösser verbunden sind. Spundwände dienen zur wasserdichten Umschließung von Baugruben oder sind Bestandteil endgültiger Bauwerke, wie Ufermauern, Schleusenwände, Dichtungsschürzen unter Staumauern, Wehren u. a. Stahlspundbohlen haben wellenförmigen Querschnitt (Abb. 15.3.2-8 von vielfältiger Form und Abmessung. Sie lassen sich gut rammen und ihre Schlösser ergeben eine dichte und zugfeste Verbindung. Stahlbeton- und Spannbetonbohlen werden für Ufermauern u. ä. verwendet. Da sie schwer rammbar sind und ihre Fugen sich nicht zuverlässig abdichten lassen, eignen sie sich nicht als Baugrubenumschließung.

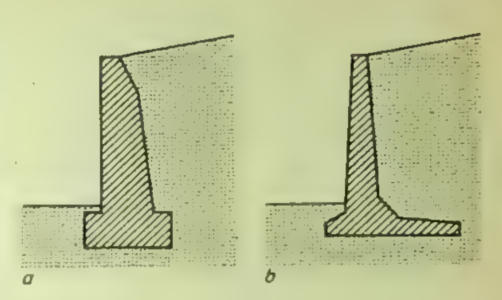


Abb. 15.3.2-7 a Schwergewichts- und b Winkelstützmauer

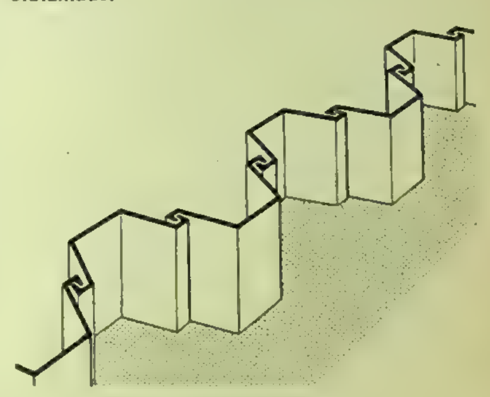


Abb. 15.3.2-8 Stahlspundwand

Ortswände werden als Umfassungswände von unterirdischen Bauwerken, z. B. U-Bahntunnel, Baugrubenwänden, Dichtungsschürzen unter Staudämmen u. ä., aber auch als Tiefgründung am Einsatzort im Erdreich hergestellt. Zu diesem Zweck wird ein Schlitz durch aneinandergereihte Bohrungen oder durch Ausbaggern hergestellt.

Bohrpfahlwände bestehen aus nebeneinander oder überschneidend gebohrten Pfählen. Die 2. Art ergibt eine dichtere und steifere Wand.

Zuerst werden die Pfähle 1, 3, 5 ... gebohrt und betoniert, anschließend die Pfähle 2, 4, 6 ... gebohrt, bewehrt und betoniert. *Schlitzwände* (Abb. 15.3.2-9) werden mit Greiferbaggern oder speziellen Schlitzgeräten ausgehoben. Damit die Erdwandungen des Schlitzes nicht einbrechen, wird er mit Tonsuspension ausgefüllt. In den Schlitz wird die Bewehrung eingehängt und durch den anschließend eingebrachten Beton die Stützflüssigkeit nach oben verdrängt.
Ortswände werden verstärkt angewendet, weil sie erschütterungsfrei und ohne Veränderung des Grundwasserstands eingebaut werden können. Die übliche Tiefe beträgt 20 m, es sind aber schon Wände bis 90 m tief aufgeführt worden.
Baugruben werden seitlich von Böschungen oder abgesteiften senkrechten Wänden umschlossen. *Abgeböschte Baugruben* nehmen mehr Platz in Anspruch und erfordern größere Erdbewegungen als abgesteifte, ermöglichen aber einen von Absteifungen unbehinderten Einsatz der Baumaschinen und benötigen kein Vorhaltematerial für den Wandbau. *Abgesteifte Baugruben* brauchen nur wenig mehr Platz als die Bauwerksgrundfläche und können bis unmittelbar an bestehende Bauwerke heranreichen. Für den Wandverbau eignen sich waagerecht oder senkrecht angeordnete Holzbohlen, stählerne Kanaldielen, die leichtere Profile als Spundbohlen und kein Schloß haben, Rammträgerwände aus in Abständen von 1 bis 2 m eingerammten Trägern und dazwischen aufeinandergesetzten Bohlen (Berliner Verbau), Spundwände, Bohrpfahl- und Schlitzwände. An Stelle von Holz- oder Stahlsteifen zwischen gegenüberliegenden Wänden oder gegen die Grubensohle ist für große Baugruben in zunehmendem Maße die rückwärtige *Verankerung* mittels eingebohrter oder eingerammter Stahlanker üblich geworden, um eine von Einbauten freie Baugrube zu erhalten. In freiem Wasser werden Baugruben durch *Fangedämme*, die meist aus 2 parallelen oder im

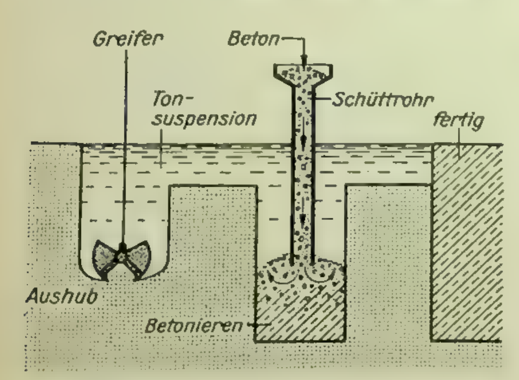


Abb. 15.3.2-9 Schlitzwand, abschnittsweise gebaut

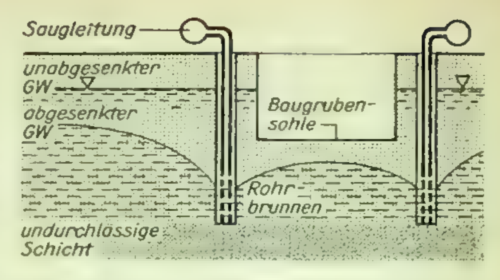


Abb. 15.3.2-10 Grundwasserabsenkung durch Rohrbrunnen (GW = Grundwasserspiegel)

Grundriß abgeschlossen kreisförmigen Spundwänden mit Erdfüllung bestehen, abgeschlossen und dann ausgepumpt. Baugruben, deren Sohle unterhalb des Grundwasserspiegels (GW) liegt, müssen künstlich entwässert werden. Bei der *offenen Wasserhaltung* wird das aus Wänden und Sohle in die Baugrube austretende Wasser in einem Sumpf gesammelt und von dort durch Pumpen in den Vorfluter gefördert. Bei der *Grundwasserabsenkung* wird durch rings um die Baugrube und erforderlichenfalls außerdem in ihrem Innern angeordnete Rohrbrunnen der Wasserspiegel bis unter die Baugrubensohle abgesenkt (Abb. 15.3.2-10).
Abdichtung gegen Grundwasser. Bauwerke mit Räumen, die unter dem Wasserspiegel liegen, müssen gegen das Eindringen vom Wasser abgedichtet werden. Die verbreitetste Art ist die Abdichtung mit bituminösen Klebemassen und Pappen. Zusammen mit den äußeren Schutzschichten aus Beton und Mauerwerk bildet sie den *Trog*, der das Bauwerk umgibt.

15.3.3. Erdbau

Beim *Erdbau* wird der Boden als Baustoff verwendet. Zu den Aufgaben gehören Geländeabtragungen, Herstellung von Einschnitten für Verkehrswege, Aushub von Kanälen, Baugruben u. ä. sowie Schütten von Dämmen für Verkehrs- und Wasserbauten. Die einzusetzenden Geräte richten sich nach Art und Umfang der Bauaufgabe und maßgeblich nach Art und Zustand des Bodens, z. B. nichtbindig oder bindig, locker oder fest, trocken oder naß.
Bodengewinnung. Ihr geht als vorbereitende Maßnahme das *Freilegen* voraus, d. h. das Roden von Bäumen und Gestrüpp sowie das Abtragen des Mutterbodens. Die Art des Gewinnens (Lösens) ist von der Bodenart und dem Umfang der Arbeit abhängig. Bei *Handbetrieb* wird mit Schaufel, Spaten, Gabel, Hacke, Brecheisen, Drucklufthammer und -spaten gearbeitet. Die *mechanische Bodengewinnung* geschieht bei leichten und mittelschweren Böden mit Hilfe von Flachbaggern, wie *Erdhobel* (*Grader*), *Planierraupe*, *Schürfkübelwagen*, mit hydraulisch absenk- und hebbarem Schürfkübel, bei großen

Abtragmengen und -tiefen mittels *Hochlöffel-*, *Tieflöffel-* oder *Greiferbagger*, bei sehr großen zu lösenden Mengen auch mit einem kleinen *Schaufelrad-* oder *Schleppschaufelbagger* (vgl. 10.4.1.).

Bei felsigem Boden setzt man von Raupenschleppern gezogene *Aufreißer* ein, während anstehender Fels gesprengt werden muß. Die Sprengtechnik wird heute aber auch für großvolumige Erdbewegungen sowie zum Beseitigen mooriger oder sumpfiger Oberflächenschichten angewendet. Eine Sonderform ist die *hydraulische Erdgewinnung* mittels *Hydromonitoren* (*Wasserwerfern*).

Bodentransport. Das Laden des gelösten oder sehr lockeren Bodens geschieht entweder sofort mit dem Bagger oder sonst mit Hilfe eines *Laders* (vgl. 10.9.1.). Zum *Fördern* werden je nach Entfernung der Gewinnungs- von der Einbaustelle oder Kippe und je nach den örtlichen Bedingungen gleisgebundene Fahrzeuge, wie *Kipploren*, *Mulden-* oder *Kastenkippwagen*, gleislose Fahrzeuge, wie *Kipper* (vgl. 10.10.) und *Dumper* oder *Bandförderer* (vgl. 10.3.1.) eingesetzt, in Ausnahmefällen auch ein *Kabelkran* (vgl. 10.6.2.), eine *Seilschwebebahn*, ein *Schrägaufzug* (Tafel 39) oder *Bremsberg*. Bei sehr kurzer zu überbrückender Entfernung erfolgt das Fördern auch sofort durch die zur Gewinnung verwendeten Flachbagger, bei Arbeit im Nassen durch Spülen mit Rohrleitungen von der Gewinnungs- zur Einbaustelle.

Bodeneinbau. Schüttungen werden an der Einbaustelle (Kippe) lagenweise eingebaut, *Dämme*, z. B. für Talsperren (vgl. 15.10.9.) durch Lagen-, Kopf- oder Seitenschüttung errichtet. Zum Verteilen und Einebnen dienen Planierraupen oder Erdhobel. Meist ist ein *Verdichten* der im aufgelockerten Zustand transportierten, abgekippten und verteilten Massen notwendig. Dies geschieht bei bindigen Erdstoffen durch Walzen (*Glatt-*, *Gummirad-*, *Schaffußwalze*) und Stampfen (Bagger mit *Freifall-Stampfplatte* oder *Explosions-* bzw. *Elektrostampfer*), bei nichtbindigen Erdstoffen durch *Vibrations-(Rüttel-)platte*, *-bohle* oder *-walze*. Die Dicke der einzelnen Schüttlagen beträgt je nach Verdichtungswirkung des Geräts 0,2 bis 1,0 m.

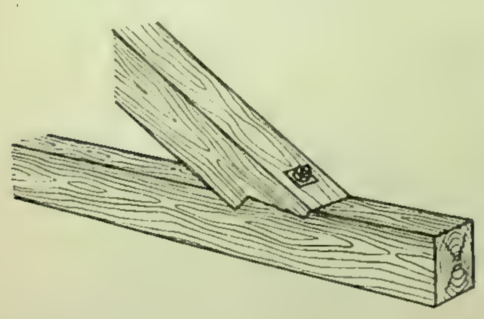


Abb. 15.4.2-1 Doppelter Versatz

Böschungen aus Lockergestein erhalten, um standfest zu sein, je nach der maßgebenden Erdart eine Neigung von 1:1 bis 1:3. Hohe Böschungen werden in Höhenabständen von ≈ 5 m durch horizontale Absätze, *Bermen*, unterbrochen. Die Böschungsflächen sind gegen Abspülen durch Begrünung oder Steinbelag zu schützen. Oberhalb von Einschnitten wird das Wasser durch Abfanggräben abgeleitet. In der Böschung auftretendes Wasser muß durch Sikkerleitungen erfaßt werden.

15.4. Holzbau

15.4.1. Holzarten

Als Bauholz dient in Europa Nadelholz, insbesondere Fichte und Kiefer, und für einzelne hochbeanspruchte Teile Eiche und Buche (vgl. 15.2.4.).

15.4.2. Holzverbindungen und -verbindungsmittel

Da Einzelhölzer von Natur aus in Länge und Querschnitt begrenzt sind, müssen sie miteinander verbunden werden, wenn man großflächige oder weit spannende Konstruktionsteile benötigt. Im zimmermannsmäßigen Holzbau benutzte man dazu *Holzverbindungen*, wie Zapfen, Überblattung, Kamm, Schwalbenschwanz, Versatz usw., von denen heute nur noch der *Versatz* (Abb. 15.4.2-1) angewendet wird. Im Ingenieurholzbau werden Hölzer mit Hilfe von *Verbindungsmitteln*, wie Schrauben (Bolzen), Dübel, Nägel, Kleber, zusammengefügt. Bei Belastung von hölzernen Tragwerken tritt in den Verbindungsstellen, außer bei Klebverbindungen, ein Schlupf auf, bis die Kraftschlüssigkeit der Verbindungen erreicht ist, der eine Verformung des Tragwerks zur Folge hat und beim Entwurf, z. B. durch Überhöhung, berücksichtigt werden muß.

Schrauben (-Bolzen) — Sechskant mit Muttern und Unterlegscheiben — werden für Gerüste, umsetzbare Bauten u. ä. verwendet; für bleibende Tragwerke sind sie wegen des großen Schlupfs ungeeignet.

Dübel sind überwiegend auf Druck und Abscheren beanspruchte Verbindungsmittel, die in eingefräste Nute oder Vertiefungen der zu verbindenden Holzteile eingesetzt oder in sie eingepreßt werden. Man verwendet heute meist *Spezialdübel* (Abb. 15.4.2-2). Alle Dübelverbindungen müssen durch Schrauben zusammengehalten werden. Sie sind besonders für die Übertragung großer Stabkräfte geeignet.



Abb. 15.4.2-2 Dübelarten: a Hartholz-Runddübel, b Ringkeildübel, c Krallen- (Bulldog-) Dübel

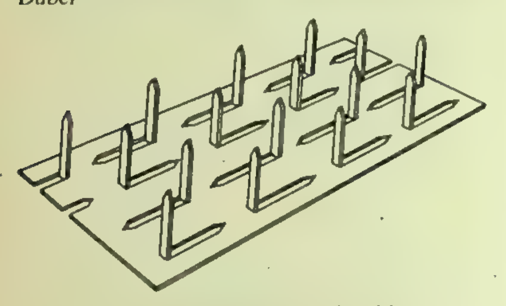


Abb. 15.4.2-3 Nagelplatte mit einseitigen nagelförmigen Ausstanzungen

Nägel. Verwendet werden Senkkopfnägel (Drahtstifte). Nagelverbindungen sind einfach herzustellen und sehr wirtschaftlich. Sie werden als Knotenverbindungen in Fachwerken und zur Herstellung vollwandiger Bretträger verwendet. In die Hölzer eingepreßte *Nagelplatten* (Abb. 15.4.2-3) ersetzen neuerdings das aufwendige Eintreiben von Einzelnägeln.

Kleber (Leime) ergeben flächenhafte Anschlüsse und sind daher besonders für die Fertigung vollwandiger Bauteile geeignet. Sie müssen witterungs- und alterungsbeständig sein; man verwendet deshalb härtbare Kunstharzkleber auf der Basis von Formaldehyd, von denen der Resorzin-Formaldehyd-Kleber der hochwertigste ist. Die Herstellung tragfähiger Klebverbindungen ist genehmigungspflichtig.

15.4.3. Tragwerke

Balken mit mehrteiligem Querschnitt. Die älteste, noch heute gebräuchlichste Art sind *verdübelte Balken*, bei denen 2 oder 3 Balken übereinander gelegt und durch in die Stoßfuge eingelegte Dübel verbunden werden. Hohl- oder I-Balken werden mittels Nägeln, Dübeln oder Kleber aus Bohlen, Brettern und Latten zusammengesetzt.

Hänge- und Sprengwerke sind seit Jahrhunderten zur Unterstützung weitspannender Balken gebräuchlich. Bei Hängewerken (Abb. 15.4.3-1) wird die Last am unteren Ende der Hängesäulen eingetragen und über die Streben in die Auflager geleitet. In Sprengwerken (Abb. 15.4.3-1) wird die Last oben in die Streben eingeleitet, ohne daß die Säulen zur Kraftübertragung herangezogen werden (daher *Schwebesäulen* genannt). Je nach der Anzahl der Zwischenabstützungen spricht man von ein-, zwei- oder mehrfachen Hänge- und Sprengwerken.

Fachwerkträger werden vielfach als Dachbinder, Unterzüge, Brückenträger, Gerüstbinder, Hallenstützen u. a. verwendet und haben je nach ihrer Aufgabe Dreieck- oder Trapezform, parallele Gurte oder einen gekrümmten Obergurt. Als Verbindungsmittel dienen Nägel oder Dübel. Die übliche Knotenausbildung ist der direkte Anschluß, bei dem einteilige Holzquerschnitte durch zweiteilige und zweiteilige Holzquerschnitte durch dreiteilige Stäbe verbunden sind (Abb. 15.4.3-2). In manchen Fällen wird die Verbindung allerdings auch – ähnlich wie im Stahlbau – mit Knotenplatten aus Blech oder Furnierplatten hergestellt. Mit Fachwerkbindern erreicht man bei Dächern und Brücken eine Spannweite von 80 bis 100 m.

Vollwandträger. Genagelte Vollwandträger haben entweder I- oder Kastenquerschnitt.

Geklebte Vollwandträger werden vorwiegend als Rechteckquerschnitt aus lagenweise verklebten Brettern – nach dem Erfinder *Hetzer-Träger* genannt – hergestellt. I-förmige Träger bestehen aus einem Steg von mindestens 2 Lagen gegen-

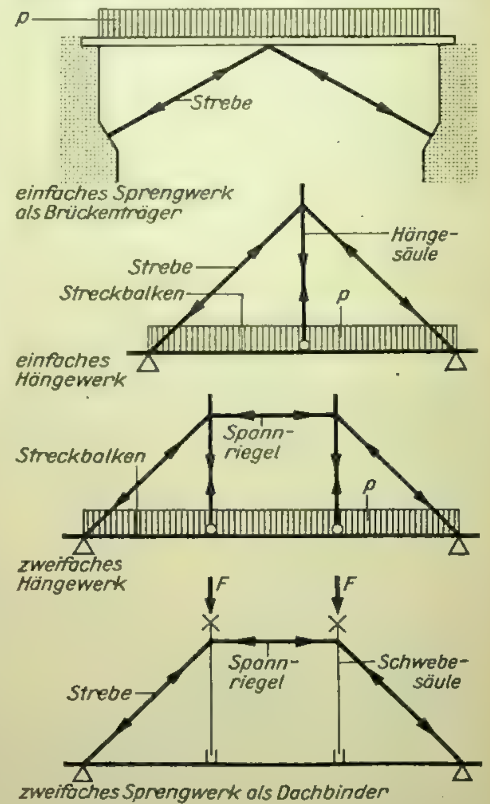


Abb. 15.4.3-1 Hänge- und Sprengwerke: P = Punkt-, p = Streckenlast

läufig schräg verklebter Bretter und daran angeklebten ein- oder mehrteiligen Gurten (Abb. 15.4.3-3). Geklebte Vollwandträger weisen vielerlei Vorzüge auf – hochmechanisierte Fertigung, gutes Aussehen, gerade oder bogenförmige Stabachse, Anpassung der Querschnittshöhe an die statische Beanspruchung – und werden daher heute bevorzugt verwendet.

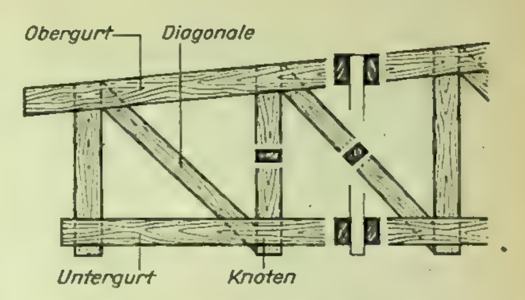


Abb. 15.4.3-2 Genagelter Fachwerkträger (trapezförmig)

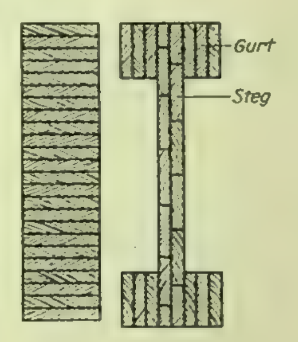


Abb. 15.4.3-3 Querschnitte geklebter Träger

15.4.4. Hölzerne Dachgerüste

Hausdächer. Im Sparrendach besteht das tragende System aus einem Sparrenpaar und einem Deckenbalken bzw. einem Massivdeckenstreifen, die einen Dreigelenkbinder darstellen (Abb. 15.4.4-1 links). Zur Längsaussteifung dienen schräg unter die Sparren genagelte Bretter oder Bohlen, die *Windrispen*. Sparren von >4,5 m Länge erhalten Zwischenabstützungen durch einen Kehlbalken (Abb. 15.4.4-1 rechts). Zur Längsaussteifung werden *Kopfbänder* zwischen den die Kehlbalken tragenden *Rähmen* und den *Stielen* angeordnet. Durch Verwendung zusammengesetzter Balken lassen sich Sparrendächer mit Sparrenlängen > 4,5 m aber auch ohne Kehlbalken bauen. Die Dachneigung des Sparrendachs soll mindestens 50 % (≈ 27°) betragen, damit dieses die erforderliche Steifigkeit erhält.
Im *Pfettendach* (Abb. 15.4.4-2) sind die Sparren, statisch betrachtet, schrägliegende Balken, die auf *Pfetten* (Kanthölzer) liegen. Diese werden von den in ≈ 4,5 m Abstand stehenden Dachbindern oder von Querwänden getragen. Je nach der Haustiefe werden in einem Binder 1, 2 oder mehr *Stuhlsäulen* und dementsprechend auch Pfettenstränge angeordnet. Man spricht von einem einfach, doppelt usw. *stehenden Stuhl*, wenn die Säulen senkrecht stehen, oder von einem *liegenden Stuhl*, wenn die Säulen sprengwerkartig geneigt sind. Als Längsverbände wirken *Kopfbänder* zwischen Stuhlsäulen und Pfetten. Pfettendächer können für jede beliebige Dachneigung ausgeführt werden.
Zur Dachhaut von Hausdächern vgl. 15.8.2.

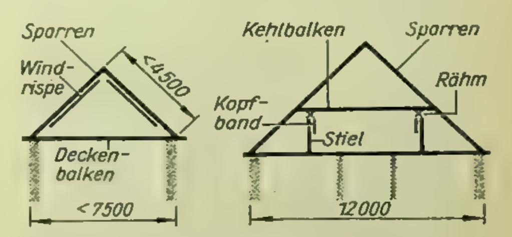


Abb. 15.4.4-1 Sparrendach (links) und Kehlbalkendach mit doppelt stehendem Stuhl (rechts)

Hallendächer spannen ohne Zwischenstützen über größere Weiten als Hausdächer und haben flache Dachneigungen. Die Dachbinder sind *Fachwerk-* und *Vollwandträger* in Form von *Einfeld-* und *Mehrfeldträgern*, *Rahmen* und *Bogenträgern*. Mit geklebten Bogenträgern als Binder werden Hallenspannweiten von 100 m erreicht. Die Dachhaut liegt auf den Pfetten, die von Binder zu Binder spannen.
Kuppeln, *Schalen* und *Faltwerke* aus Holz werden zur stützenfreien Überspannung großer Räume, z. B. von Sport- und Ausstellungshallen (Tafel 56), gebaut. Das Tragwerk der Kuppel wird von radial angeordneten Bindern und konzentrisch liegenden Pfetten gebildet. Die Binder stützen sich oben gegen einen Druckring aus Holz oder Stahl und unten gegen einen Zugring aus Beton oder Stahl. *Schalen* sind selbsttra-

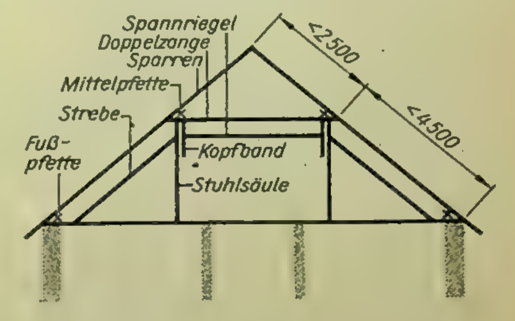


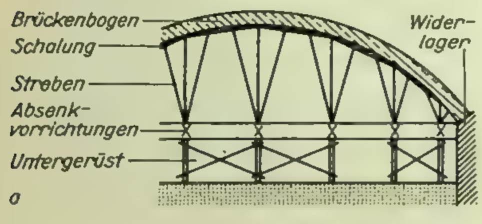
Abb. 15.4.4-2 Pfettendach mit doppelt stehendem Stuhl

gende Flächen aus mehreren Lagen winklig zueinander verlegter, miteinander vernagelter oder verklebter Bretter. *Faltwerke* setzen sich aus Platten zusammen, die aus Kantholz- oder Bohlenrahmen bestehen und mit Brettern, in sich verklebten Brettlagen oder Platten aus Holzwerkstoff beplankt sind. Als Faltwerke werden neben Dächern vor allem Turmhelme ausgebildet, die man im ganzen mit einem entsprechend hoch ausladenden Kran oder einem Kranhubschrauber auf den Turm aufsetzt.

15.4.5. Holzgerüste

Holzgerüste sind Hilfseinrichtungen zur Herstellung und Instandhaltung von Bauwerken und werden nach Erfüllung ihres Zwecks wieder abgebaut. Hölzerne Gerüste werden mehr und mehr von Gerüsten aus Stahl oder Leichtmetall verdrängt.

Stangen-, *Leiter-* und *Bockgerüste*, die nach der Art ihrer senkrechten Elemente benannt sind, werden nach handwerklichen Regeln und amtlichen Vorschriften zusammengebaut. Sie dienen hauptsächlich als *Arbeits-* (Maurer-, Putz-) und *Schutzgerüste*, z. B. zur Aufrechterhaltung des Fußgängerverkehrs entlang in Reparatur befindlicher Häuser, zum Auffangen herabfallender Bauteile, Werkzeuge u. a. (*Fanggerüste*), mit Fangnetzen auch zur Verhinderung des Absturzes von Menschen. Andere Formen sind *Ausleger-* und *Hängegerüste*. *Abgebundene Gerüste* werden vor dem Aufstellen nach statischer Berechnung und Zeichenunterlagen zum Zusammenbau vorbereitet. Sie werden als *Lehr-*, *Montagegerüste*, z. B. für die Aufstellung von Stahlkonstruktionen, und als Fördergerüste, z. B. für Kranbahnen, Gleise, Fahr- und Gangbahnen, angewendet. Die Lasten werden durch *Stiele* und *Streben* oder durch freitragende *Gerüstbinder* zur Gründung abgeleitet. Um räumliche Steifigkeit zu erzielen, sind *Aussteifungsverbände* erforderlich.



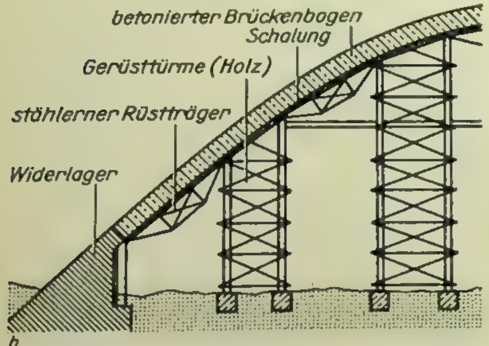


*Abb. 15.4.5-1 Lehrgerüste für Betonbogenbrücken: **a** Strebensystem, **b** Gerüsttürme mit Rüstträgern*

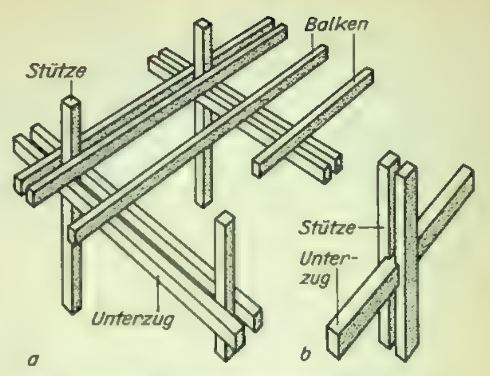


*Abb. 15.4.6-1 Skelettbauweise: **a** Stützen mit Doppelträgern, **b** Träger zwischen Doppelstützen*

Lehrgerüste haben die Last des noch nicht erhärteten Betontragwerks zu tragen und dienen als Lehre für die Formgebung des Bauwerks. Lehrgerüste großer Brücken sind beachtenswerte Ingenieurbauwerke. Kann man sie durchgehend abstützen, so ist das *Strebensystem* (Abb. 15.4.5-1a) üblich, bei dem jeweils mehrere Streben fächerartig zusammengefaßt und auf eine Absenkvorrichtung (Gerüstspindel, Sandtopf) zum Ausschalen gesetzt werden. Durch Verwendung von hölzernen Gerüsttürmen und darauf verlegten stählernen Rüstträgern (Abb. 15.4.5-1b) wird Abbundarbeit eingespart. Für freitragende Lehrgerüste werden Fachwerkbogenträger mit Spannweiten bis zu 100 m als Binder verwendet.

15.4.6. Holzhäuser

Der moderne Holzhausbau zeichnet sich durch einen hohen Vorfertigungsgrad aus. Die geringe Eigenmasse ergibt günstige Transport- und Montagebedingungen. Konstruktiv sind 2 Systeme gebräuchlich.

Tafelbau. Die Wandtafeln sind tragende geschoßhohe Elemente, die je nach Vorfertigungsgrad im Werk komplett einschließlich Installation und Oberflächenbehandlung hergestellt werden. Decken und Flachdächer werden ebenfalls aus vorgefertigten Tafeln, Steildächer meist zimmermannsmäßig gebaut. Die Breite der Elemente

reicht von Rasterweite — meist 1,25 m — bis zur vollen Raum- oder Hauslänge. Die Tafelelemente bestehen aus einem Kantholzrahmen, der mit Bauplatten oder Brettschalung beidseitig beplankt ist, zwischen denen Dämmstoffe und — wenn erforderlich — eine Dampfsperre eingebaut werden. Die Elemente werden durch Schrauben, Haken u. ä. verbunden und die Stoßfugen durch Deckleisten oder Spezialprofile gedichtet.

Skelettbau (Abb. 15.4.6-1). Das räumliche Tragsystem besteht aus den *durchgehenden Stützen (Ständer)*, den *Unterzügen (Rähme)* und den *Deckenträgern (Balken, Riegel)*. Zur vertikalen Aussteifung sind *Wandscheiben, Rahmen* oder *Diagonalverbände* notwendig. Die Skelettbauweise ermöglicht eine vielfältige Gestaltung des Bauwerks und der Ausbildung der Wände.

15.4.7. Brandverhalten von Holzkonstruktionen

Die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen aus Holz kann erstaunlich hohe Werte erreichen. Diese Eigenschaft beruht darauf, daß Holz durch Verkohlung der Außenschicht eine Schutzschicht bildet, die den Brandfortschritt stark verzögert. Besonders günstig verhalten sich daher große Vollquerschnitte, wie sie bei brettschichtverklebten Tragelementen üblich sind. Diese günstige Tatsache hat wesentlich zur zunehmenden Verbreitung moderner Holzkonstruktionen beigetragen. Zusätzlich kann die Feuerwiderstandsfähigkeit von Holzkonstruktionen durch feuerhemmende Anstriche verbessert werden.

15.5. Steinbau

Durch die industriellen Bauprozesse ist der traditionelle Steinbau in seiner Bedeutung zurückgegangen. Zur Herstellung von *Mauerwerk* werden natürliche und künstliche Steine verwendet. Zu den *künstlichen Steinen* gehören gebrannte Ziegelsteine, Kalksandsteine, zementgebundene Hohlblocksteine aus Leicht- oder Schwerbeton und Gasbeton-Wandsteine. Die Steine werden unter Einhaltung der Regeln des *Mauerverbands* verlegt und mit Mörtel verbunden. Die Dicke des Mauerwerks ist abhängig von seiner mechanischen und physikalischen Beanspruchung, der Druckfestigkeit, den raumgeometrischen Abmessungen, z. T. auch der Wärmeleitfähigkeit oder dem Wärmedurchlaßwiderstand der Steine.

15.5.1. Natursteinmauerwerk

Für Natursteinmauerwerk verwendet man Erstarrungsgesteine, wie Granit, Porphyr u. a., oder Ablagerungsgesteine, wie Kalk- und Sandsteine. Die Natursteine müssen frostbeständig sein. Ihre Verarbeitung richtet sich nach der Gesteinsart und dem Gefüge (leicht oder schwierig zu bearbeiten), der baulichen Struktur (Mauer, Wand, Gewölbe) und der beabsichtigten Sichtgestaltung. Die klassischen Mauerverbandsregeln sind bei der Herstellung von Naturmauerwerk zu beachten.

Trockenmauerwerk besteht aus lagerhaften, wenig behauenen Steinen, die ohne Mörtel so verlegt werden, daß sie dicht übereinander liegen und keine Hohlräume im Mauerwerk entstehen.

Zyklopen- oder **Findlingsmauerwerk** (Abb. 15.5.1-1a) entsteht durch die Vermauerung wenig lagerhafter, auch runder oder gespaltener Steine. Sie werden satt in ein Mörtelbett verlegt, wobei Hohlräume durch kleine Steine ausgezwickt werden.

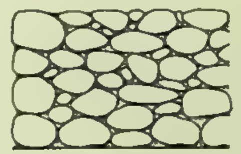




Abb. 15.5.1-1 a Findlingsmauerwerk, b Bruchsteinmauerwerk

Bruchsteinmauerwerk (Abb. 15.5.1-1b) ist die einfachste Verarbeitung der unterschiedlichsten Steinbrocken, wie sie im Steinbruch anfallen. Der Maurer hat beim Verarbeiten die Steine lagerhaft zu behauen, auf ihre Struktur (Schichtung) und auf eine ausreichende Überdeckung der Stoßfugen zu achten. Infolge der ungleichen Höhe der Bruchsteine sind die Schichten unregelmäßig. Alle 1,50 m ist das Mauerwerk in der Höhe abzugleichen, so daß eine durch den Mauerquerschnitt durchgehende horizontale Lagerfuge entsteht.

Schichtmauerwerk. Je nach der Bearbeitung der Steine und ihrer Lagerung im Mauergefüge, der Ausbildung der Lager- und Stoßfugen unterscheidet man *hammerrechtes, unregelmäßiges* (die Steinschichten gehen nicht in gleicher Höhe horizontal durch) und *regelmäßiges* (die Höhe der Steine in einer Schicht ist gleich) Schichtmauerwerk.

Quadermauerwerk besteht aus Steinblöcken, deren Sichtflächen und scharfkantige Ränder vom Steinmetzen bearbeitet wurden. Heute werden die Blöcke vorwiegend mit maschineller Technik (Steinsägen) auf die im Versetzplan festgelegte Größe gebracht. Dabei werden mindestens dreiseitig ebene Flächen und scharfe Kanten erreicht. Die Quader werden in ein

dünnes Mörtelbett (Kalkmörtel) verlegt. Quadermauerwerk ist teuer, arbeitsaufwendig und wird nur noch für repräsentative Bauwerke angewendet, wobei die Quader meist nur als Verblender mit oder ohne statische Mitwirkung, abhängig von der Tiefe der Einbindung, in den Mauer- oder Wandquerschnitt einbezogen werden.

15.5.2. Ziegelmauerwerk

Durch die guten mechanischen (Druckfestigkeit) und bauphysikalischen (Wärmedämmung) Eigenschaften wird der gebrannte Ziegelstein für den Bau kleinerer oder nicht typisierter Bauwerke, bei Rekonstruktionen, Werterhaltungen und Umbauten noch in größerem Umfang angewendet. Das Ziegelmauerwerk ist im Verband anzulegen. Es kann nur bedingt Zugspannungen ohne Rißbildungen aufnehmen. Ziegelmauerwerk als Teil der Primärstruktur eines Bauwerks ist den Bauvorschriften entsprechend zu dimensionieren und durch Querwände und Decken so auszusteifen, daß es die horizontalen und vertikalen Kräfte aufnehmen kann. Um unzulässige Spannungen durch Temperaturschwankungen und Setzungen zu vermeiden, sind bei langgestreckten Baukörpern in festgelegten Abständen vertikal durchgehende Bewegungsfugen anzulegen. Höhere Zugfestigkeiten kann man durch Einlegen von Rundstahl (max. 8 mm Durchmesser) unter Verwendung von Mauerziegeln der Güteklasse MZ 150 und Zementmörtel (M Gr III) erreichen (*bewehrtes Mauerwerk*). Die Bewehrung wird in jeder zweiten Schicht (zumindest 4 Rundstähle pro Meter Mauerhöhe) in die Lagerfugen eingelegt und ist in den anstoßenden Querwänden zu verankern.

Mauerziegel werden als *Vollziegel* (Mauerklinker) oder *Hohlziegel* (Hochloch-, Langlochziegel) hergestellt. Langlochziegel dürfen nur für nichttragendes Mauerwerk verwendet werden. Das Ziegelsortiment für Hochloch- und Langlochsteine ist in seinen Abmessungen dezimetrisch und in seinen Rastersprüngen (Längen- und Höhenraster) auf 300 mm festgelegt. Die Ziegelbreiten ergeben sich aus den erforderlichen Wanddicken.

Der *Verband*, die Art und Weise, wie die Mauerziegel im Mauerwerk neben- und übereinander angeordnet werden, ist für die Standsicherheit und bedingt auch für die Biegezugfestigkeit einer Wandkonstruktion von Bedeutung.

Beim *Läuferverband* bestehen die Schichten ausschließlich aus Läufersteinen, beim *Binderverband* (Streckerverband, Abb. 15.5.1-2a) nur aus Bindern. Im *Blockverband* wechseln Läufer- und Binderschichten. In den Läufer- bzw. Binderschichten liegen die Mauerziegel senk-

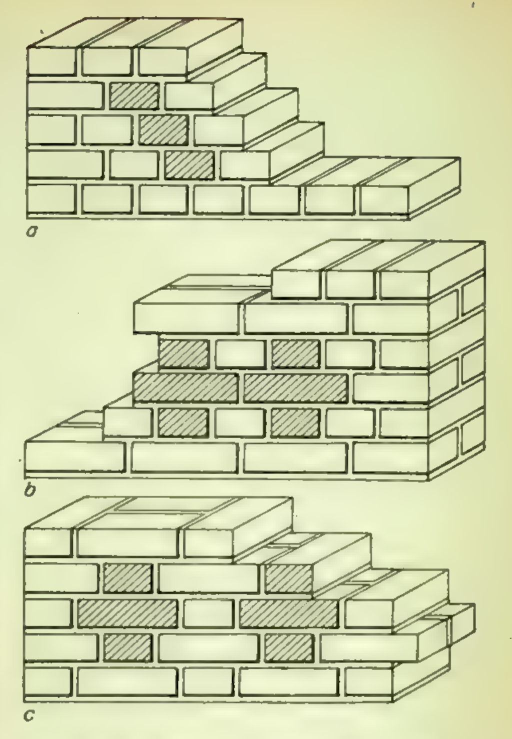


*Abb. 15.5.1-2 Mauerverbände: **a** Binderverband, **b** Kreuzverband, **c** Zierverband (Gotischer Verband)*

recht übereinander. Beim *Kreuzverband* (Abb. 15.5.1-2b) sind dagegen die Läufer in ihren Schichten um eine halbe Steinlänge versetzt. Bei Ziegelmauerwerk, das unverputzt bleibt (Rohbau), wendet man aus Variations- und Gestaltungsgründen *Zierverbände* (Abb. 15.5.1-2c, englischer, holländischer, polnischer Zierverband) an.

Kalksandsteine sind in den Abmessungen dem Mauervollziegel angeglichen. Sie bestehen aus Kalk und überwiegend aus quarzitischen Zuschlagstoffen, werden geformt, verdichtet und im Autoklaven unter Dampfdruck gehärtet. Sie werden als Vollsteine oder Kalksandlochsteine hergestellt. Infolge ihrer hygroskopischen Eigenschaften sind sie für Außenwände und in Feuchträumen weniger geeignet und werden für Innenwände von Lagerräumen und Kellern verwendet. Sie werden im Verband wie Mauerziegel vermauert.

15.5.3. Mauerwerk aus Betonsteinen

In zunehmendem Maß werden für die Herstellung von Mauerwerk *Betonsteine* verwendet. Sie werden in Betonwerken maschinell als großformatige Voll- oder Hohlblocksteine aus Natur-

oder Hüttenbims, Schlacke, Ziegelsplitt oder Kiessand und einem hydraulischen Bindemittel hergestellt. Überwiegend werden die Hohlblocksteine aus Leicht- oder Schwerbeton als Zwei- oder Dreikammersteine mit fünfseitig geschlossenen Luftkammern in verschiedenen Abmessungen und Güteklassen für Innen- und Außenwände gefertigt und je nach Mauerdicke als Läufer oder Binder im Mauerwerk verlegt. Durch ihre Abmessungen können sie auch mit Mauerziegeln zusammen vermauert werden. Aus bauphysikalischen Überlegungen sollte man ein solches Mischmauerwerk allerdings vermeiden.

15.5.4. Mauerwerk aus Gasbeton-Wandbausteinen

Gasbeton-Wandbausteine aus Silikatbeton werden industriell hergestellt und im Autoklaven gehärtet. Sie haben eine niedrige Rohdichte (600 bis 700 kg/m^3), besitzen gute Wärmedämmeigenschaften und lassen sich leicht sägen, bohren, fräsen und nageln. Die Steine werden mit Versatz der Stoßfugen vermauert.
Für Wände aus Gasbeton-Wandbausteinen werden Mindestdicken gefordert, für belastete Innen- und Außenwände 200 mm, für unbelastete Trennwände (Innenwände) 70 mm. Sie dürfen nur für Mauerwerk über der Kellerdecke verwendet werden und müssen gegen Spritzwasser gesichert sein. Fugen im nach dem Dünnbettverfahren hergestellten Mauerwerk sind zulässig. Fugendicke, Kleber und Verbundmasse sowie Ausführung der Klebefuge sind den Verarbeitungsvorschriften der Gasbetonwerke zu entnehmen.

15.6. Beton- und Stahlbetonbau

15.6.1. Betonbau

Betonarten. Beton ist ein Gemenge aus Bindemittel, Zuschlagstoff und Wasser, das in weichem Zustand in Schalungen gebracht wird und an der Luft oder unter Wasser erhärtet. Die Betonarten werden i. allg. nach der Art des Bindemittels (z. B. Zement-, Plast-, Asphaltbeton), der Kornform des Zuschlagstoffs (z. B. Kies-, Splittbeton), der Rohdichte (z. B. Schwerst-, Schwer-, Leichtbeton), der Herstellung, Verarbeitung, Konsistenz (z. B. Stampf-, Guß-, Rüttel-, Pump-, Schleuder-, Gas-, Schaumbeton) u. a. Merkmalen unterschieden. Wird keine genauere Bezeichnung benutzt, so wird unter „Beton" dichter Schwerbeton mit Zement als Bindemittel und einer Rohdichte von 1900 bis 2400 kg/m^3 verstanden (vgl. 15.2.2.).
Eigenschaften des Betons sind abhängig von der Rezeptur, der Art und Menge des Bindemittels,

Zuschlagstoffs und Wassers. Die wichtigste Eigenschaft ist die Druckfestigkeit, die an genormten Probekörpern, z. B. Würfel, Prisma, Zylinder, nach 28 Tagen geprüft wird. Die Biegezug-, Zug-, Scher- und Torsionsfestigkeit ist wesentlich geringer (Tab. 15.6.1-1). Zur Zeit werden Betone mit Druckfestigkeiten bis 60 N/mm^2 verwendet, in Ausnahmefällen jedoch auch höhere Festigkeiten erreicht. Die Festigkeit des Betons nimmt mit dem Alter zu. Wesentlichen Einfluß auf die Festigkeit haben u. a. die Kornzusammensetzung des Zugschlagstoffs, die Zementart und -menge, der Wasser-Zement-Wert und die Sorgfalt bei der Verdichtung und der Nachbehandlung.

Tab. 15.6.1-1 *Festigkeitsarten des Betons im Vergleich zur Würfeldruckfestigkeit R*

Zylinderdruckfestigkeit	0,8...0,9 · R
Prismendruckfestigkeit	0,7...0,9 · R
Biegedruckfestigkeit	1,0...1,2 · R
Zugfestigkeit	0,06...0,12 · R
Spaltzugfestigkeit	0,07...0,13 · R
Biegezugfestigkeit	0,10...0,20 · R
Scherfestigkeit	0,20...0,30 · R
Torsionsfestigkeit	0,10...0,15 · R

Durch Warmbehandlung während der Erhärtung wird bereits nach einigen Stunden eine hohe Festigkeit erreicht. Schädliche Laugen greifen Beton i. allg. nicht an, während Säuren und Salze ihn mehr oder weniger zerstören. Je nach der chemischen Zusammensetzung wirken Öle und Fette verschieden auf Beton ein. Pflanzliche und tierische Öle und Fette sind betonschädlich, weil sich Bestandteile des Zementsteins zu fettsauren Salzen, den sog. Kalkseifen, umsetzen. Öle geringer Viskosität dringen tief in den Beton ein und wirken als Schmiermittel zwischen Zement und Zuschlagstoffkörnern. Mineralöle enthalten bei guter Reinigung keine Säuren und sind nicht betonschädlich, können aber als Schmiermittel wirken.
Der erhärtende Beton trocknet im Laufe der Zeit aus. Diese Austrocknung bewirkt eine Volumenverringerung, die als *Schwinden* bezeichnet wird. Hohe Zementzugaben und hohe Wasser-Zement-Werte sowie eine trockene warme Umgebung begünstigen das Schwinden und damit eine mögliche Rißbildung. Durch die Anwendung magerer Mischungen, geringer Wasser-Zement-Werte und möglichst langes Feuchthalten des Betons wird das Schwinden reduziert. Beim Abbinden entsteht Wärme, sog. *Hydratationswärme*, die das Schwinden begünstigt und bei Massenbeton, z. B. Talsperren, Fundamentblöcken usw., zu Rissen führen kann. Durch die Verwendung von Zementen mit geringer Wär-

metönung, eine geeignete Zusammensetzung des Betongemischs und eventuelle Kühlung können die Temperaturspannungen im Zementstein und damit die Rißgefahr verringert werden. Durch Feuchtigkeitsaufnahme dehnt sich der Beton aus. Dieser Vorgang wird als *Quellen* bezeichnet. Beim Belasten eines Betontragwerks entsteht neben einer elastischen eine plastische Verformung. Die plastische Verformung bleibt nach Wegnahme der Last bestehen und wird als *Kriechen* bezeichnet. Der Kriechvorgang erstreckt sich bei Dauerbelastung über einen langen Zeitraum, bis ein Beharrungszustand erreicht ist. Die Größe des Kriechmaßes ist u. a. abhängig vom Alter des Betons vor der ersten Belastung, der Größe der Belastung, der Betonfestigkeit und der Lagerungsart des Bauteils.

Betonbauweise. Bauwerke aus Beton müssen so konstruiert werden, daß sie vorwiegend auf Druck beansprucht werden. Das führt in der Regel zu großen Querschnittsabmessungen der Bauglieder. Die Anwendung der Betonbauweise beschränkt sich daher auf Bauteile, bei denen große Querschnitte nicht störend wirken, wie z. B. Fundamente, Gewölbe, Bögen, bei denen massige Baukörper wegen der Standsicherheit gewünscht werden, wie z. B. Talsperren, Stützmauern, oder bei denen andere bautechnische Forderungen, wie Schall- oder Strahlenschutz, Wärmebeharrung usw., ohnehin massige Bauteilquerschnitte erfordern.

In den meisten Anwendungsbereichen ist die Betonbauweise in den letzten Jahrzehnten vom Stahl- und Spannbeton verdrängt worden (vgl. 15.6.2. und 15.6.3.).

15.6.2. Stahlbetonbau

Wirkungsweise. Beim Stahlbetonbau wird durch sinnvolle Verbindung von Beton und Stahl ein neuer hochwertiger Verbundbaustoff geschaffen. Dem Beton wird entsprechend seiner großen Druckfestigkeit die Übertragung der Druckkräfte und dem Stahl die der Zugkräfte zugewiesen (Abb. 15.6.2-1). Der Stahlbeton ist in seinen charakteristischen Eigenschaften, dem Tragverhalten, der Rißbildung und der Durchbiegung, von der Wirksamkeit des Verbunds von Stahl und Beton abhängig. Die eingelegten Stahlstäbe, *Bewehrung* oder *Armierung* genannt (Tafel 55), werden durch die Zementumhüllung im Beton vor Korrosion geschützt. Die Bewehrung muß beim Auftreten von Rissen im Zugbereich biegebeanspruchter Bauteile, die beim Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons entstehen, die Zugkräfte allein übernehmen und verhindert damit einen sofortigen, plötzlichen Zusammenbruch des Bauteils. Bei druckbeanspruchten Bauteilen ist durch die Anordnung von Bewehrung eine Verringerung der Querschnittsabmessungen des Bauteils möglich.

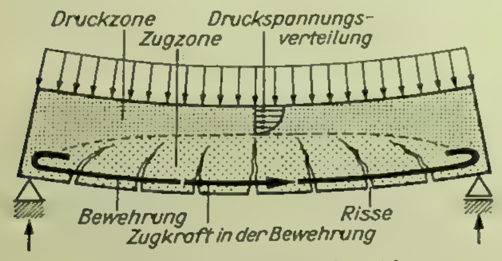


Abb. 15.6.2-1 Wirkungsweise eines biegebeanspruchten Stahlbetonbauteiles

Bewehrung. In der DDR werden als Bewehrung für Stahlbetonbauteile glatte Rundstähle (St A-O, St A-I, St B-IV) und Rippenstähle (St A-III, St T–III, St T–IV) verwendet. St A–O, St A–I und St A–III sind warmgewalzte, naturharte Betonstähle, St B–IV ist ein kaltgezogener, St T–III und St T–IV sind thermisch verfestigte Betonstähle. Der *Bewehrungsbau* besteht aus den Arbeitsgängen Richten, Ablängen, Biegen und Zusammenbau von Geflechten durch Knüpfen mit Bindedraht oder durch Schweißen. Im Interesse der industriellen Verarbeitung der Bewehrung, insbesondere beim Zusammenbau der Geflechte, wird besonderer Wert auf die volle Schweißbarkeit der Betonstähle gelegt. Das Widerstandspunktschweißen (vgl. 8.4.2.) gewinnt besondere Bedeutung. Die Verwendung von Betonstählen mit größeren Festigkeiten führt zur Einsparung von Bewehrungsstahl.

Nach ihrer statisch-konstruktiven Wirkung wird zwischen Trag-, Querbewehrungs- und technologisch-konstruktiven Bewehrungsstäben unterschieden. Die Tragstäbe als *Hauptbewehrung* werden bei Platten und Balken in Spannrichtung verlegt und nehmen die Biegezugkräfte auf. Bei Stützen nehmen die Tragstäbe überwiegend Druckkräfte auf. Die Anzahl und die erforderlichen Querschnitte der Tragstäbe werden in der statischen Berechnung ermittelt. Querbewehrungsstäbe unterscheiden sich in ihrer Form bei stabförmigen Elementen, wie Balken, Stützen, und flächenhaften, wie Platten, Scheiben. Die Querbewehrungsstäbe in stabförmigen Elementen werden *Bügel* genannt. Sie haben in Balken die Aufgabe der Querkraftsicherung und der Verbindung der Betondruckzone mit den Zugstäben der Hauptbewehrung. In Stützen u. a. Druckgliedern, z. B. Wände, verhindern die Bügel das Ausknicken der gedrückten Tragstäbe. In flächenhaften Elementen werden die Querbewehrungsstäbe *Verteilerstäbe* genannt. Sie werden rechtwinklig zu den Tragstäben verlegt und durch Knüpfen oder Schweißen an den Kreuzungspunkten mit ihnen verbunden. Die Verteilerstäbe haben die Aufgabe, Kräfte, die aus der Querkontraktion, dem Schwinden des Betons und aus Temperaturänderungen resultieren, zu übernehmen, Einzellasten auf dem Bau-

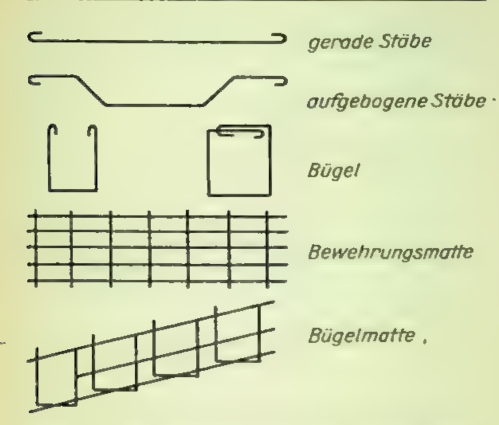


Abb. 15.6.2-2 Grundformen von Bewehrungsstäben

teil auf eine größere mittragende Fläche zu verteilen und die gegenseitigen Abstände der Tragstäbe beim Betonieren zu gewährleisten. Die Anzahl und der Durchmesser der Querbewehrungsstäbe werden durch statische Berechnungen oder konstruktive Forderungen festgelegt.
Konstruktiv und technologisch erforderliche Bewehrungsstäbe haben i. allg. nur kurzzeitig bei der Errichtung von Stahlbetonbauwerken bzw. -elementen Aufgaben zu erfüllen und sind für das Tragvermögen im Endzustand bedeutungslos. Entsprechend ihrer Zweckbestimmung wird z. B. unterschieden zwischen *Montagestäben*, *Abstandhaltern*, die in stabförmigen bzw. flächigen Elementen die gewünschte Lage der Bewehrung beim Betonieren sichern sollen, *Transportösen* u. a. (Abb. 15.6.2-2).

Grundformen des Stahlbetons. Die hervorragenden Eigenschaften und die nahezu unbeschränkten Möglichkeiten in der Formgebung haben im Laufe der Entwicklung zu vielfältigen Formen geführt, die sich jedoch überwiegend auf die Grundformen Platten, Balken und Stützen zurückführen lassen. Die hauptsächliche Funktion aller Stahlbetonelemente ist die Ableitung der Lasten in den Baugrund.
Platten sind flächenhafte Tragwerke mit meist rechteckigem oder quadratischem Grundriß, bei denen die Belastung rechtwinklig zur Elementenebene erfolgt und Biegebeanspruchung hervorgerufen wird. Sie nehmen die Verkehrslasten auf Geschoßdecken, Brücken usw. auf und leiten sie in Balken oder tragende Wände ab. Die Anordnung der Bewehrung ist von der Anzahl, Zuordnung und Gestaltung der unterstützten Plattenränder abhängig. Platten mit länglichem Grundriß tragen ihre Lasten überwiegend in Richtung der kürzeren Spannweite ab. Sie erhalten in dieser Richtung eine Tragbewehrung (*einachsig bewehrte Platte*) und rechtwinklig dazu eine Querbewehrung (Abb. 15.6.2-3). Platten mit quadratischem oder annähernd quadratischem Grundriß werden in beiden Richtungen mit Tragbewehrung versehen (*kreuzweise bewehrte Platte*). Sie leiten die Kräfte über alle unterstützten Plattenränder ab.
Im Industrie-, Verkehrs- und Brückenbau werden überwiegend einachsig oder kreuzweise bewehrte Vollbetonplatten angewendet. Im Wohnungs- und Gesellschaftsbau werden größtenteils *Hohlraumplatten*, z. B. Hohlraumfertigteilplatten, Stahlbetonrippen-, Stahlsteindecken u. a., wegen ihrer besseren Wärme- und Schalldämmung sowie ihrer geringeren Eigenmasse angewendet.
Scheiben sind flächige, ebene Bauteile, die überwiegend in ihrer Elementenebene auf Druck oder Zug belastet werden. Sie werden u. a. im Hochbau zur Aussteifung von Gebäuden, bei Stützmauern im Erd- und Wasserbau sowie im Behälterbau verwendet.
Balken sind stabförmige Tragelemente mit großen Abmessungen längs ihrer Achse und kleinen Abmessungen in der Querschnittsebene. Sie haben meist einen rechteckigen, T- oder I-förmigen Querschnitt (Abb. 15.6.2-4). Balken mit gekrümmter Längsachse werden als *Bogen* bezeichnet. Balken übernehmen i. allg. die Deckenlasten und leiten sie in tragende Wände, Stützen oder Rahmen ab; sie können jedoch auch unmittelbar belastet sein, wie z. B. Kranbahnbalken. Da die Lastableitung nur in einer Richtung erfolgt, wird die Tragbewehrung ebenfalls nur in einer Richtung vorgesehen. Als Tragbewehrung werden in der Regel gerade und aufgebogene

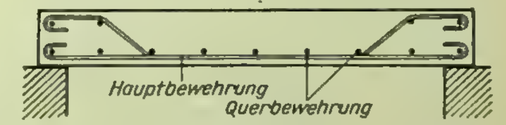


Abb. 15.6.2-3 Bewehrung einer Stahlbetonplatte

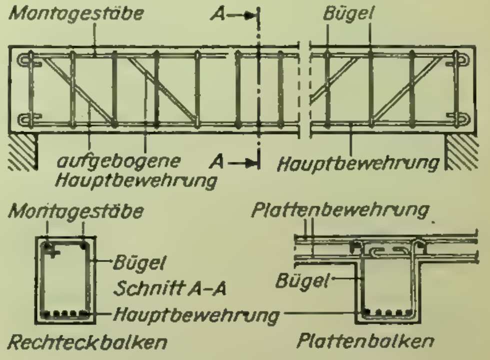


Abb. 15.6.2-4 Bewehrung eines Stahlbetonbalkens mit Rechteck- und Plattenbalkenquerschnitt

Stäbe, eventuell Zulagestäbe, verwendet. Die Tragbewehrung muß von offenen oder geschlossenen Bügeln, die bis in den Druckbereich des Balkens reichen, umschlossen werden.
Tragstäbe, Bügel und Montagestäbe werden durch Verknüpfen oder Verschweißen fest miteinander verbunden, so daß sie während des Transportierens des Bewehrungskorbs und während des Betonierens ein unverschiebliches Gerippe bilden.
Stützen sind stabförmige Tragelemente, die überwiegend in Richtung der Stabachse Kräfte aus Dach- und Deckenkonstruktionen in die Fundamente einleiten. Nach der Art der Bewehrung unterscheidet man *Stützen mit Bügelbewehrung* und *umschnürte Stützen* (Abb. 15.6.2-5).
Aus den 3 Grundformen Platte, Balken und Stütze lassen sich zusammengesetzte Konstruktionselemente bilden, die wie die Grundelemente eine einheitliche gemeinsame Tragwirkung besitzen. Voraussetzung dafür ist, daß die einzelnen Grundformen biegesteif miteinander verbunden sind.
Beim *Plattenbalken* (vgl. 15.6.2-3) ist die Stahlbetonplatte biegesteif an den Balken angeschlossen. Die Platte hat dabei eine zweifache Bedeutung, einmal als selbständiges Flächentragwerk, zum anderen als Druckbereich des Balkens. Im

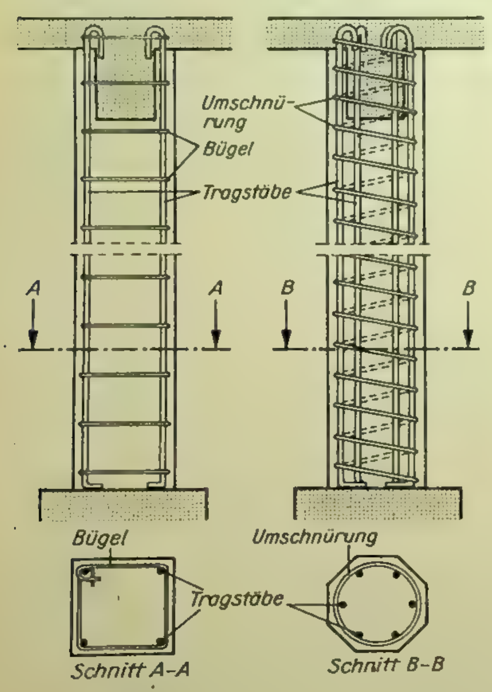


Abb. 15.6.2-5 Bügelbewehrte und umschnürte Stütze

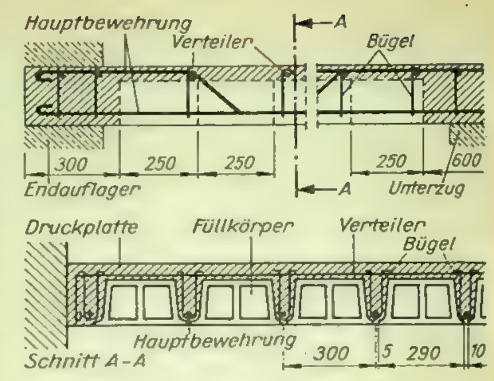


Abb. 15.6.2-6 Stahlbetonrippendecke

Montagebau werden Plattenbalken oft als Einzelelemente ausgebildet. Auch unsymmetrische Plattenbalken und T-, I-, U-Querschnitte werden eingesetzt. Sonderformen des Plattenbalkens sind die *Rippendecken* (Abb. 15.6.2-6), die als eine Aneinanderreihung kleiner Plattenbalken angesehen werden können, deren Zwischenräume entweder frei bleiben können oder mit Hohlkörpern aus Leichtbeton, gebrannten Tonkörpern, Deckensteinen u. a. ausgefüllt werden. Rippendecken mit Füllkörpern sind wegen ihrer guten Wärme- und Schalldämmung für den Wohnungsbau und gesellschaftliche Bauten gut geeignet.
Rahmen entstehen durch die biegesteife Verbindung von Balken und Stützen. Sie können ein- oder mehrfeldrig, ein- oder mehrstöckig und in vielen anderen Varianten ausgeführt werden. Stahlbetonrahmen bilden die Grundlage für die Stahlbetonskelettbauweise (vgl. 15.6.4.). Eng verwandt mit den Rahmen sind *Pilzdecken*, bei denen ohne Vermittlung von Balken kreuzweise bewehrte Stahlbetonplatten biegesteif mit Stahlbetonsäulen verbunden sind. Zur besseren Einleitung der Kräfte von der Platte in die Stütze ist der Stützenkopf pilzkopfartig ausgebildet. Unter bestimmten Voraussetzungen können die Pilzköpfe entfallen. Diese Variante heißt *Flachdecke*.
Neben den Grundelementen und den daraus zusammengesetzten Konstruktionselementen mit ein- oder zweidimensionaler Tragwirkung sind in den vergangenen 40 Jahren eine Anzahl räumlicher Tragwerke (Abb. 15.6.2-7) entwickelt worden, die es gestatten, große Räume mit geringem Materialaufwand stützenfrei zu überdecken und Stahlbetonbauwerke von großer Höhe, wie z. B. Industrieschornsteine, Kühltürme, Fernsehtürme usw., mit relativ geringen Wanddicken zu errichten. Solche Tragwerke bestehen aus einfach oder doppelt gekrümmten Flächen (Schalen) oder aus zu Prismen zusammengesetzten Scheiben (Faltwerke). Sind Schalen doppelt gekrümmt, so spricht man von *Kuppeln*.

Faltwerke werden in erster Linie beim Behälter- und Hallenbau angewendet. Die einheitliche Tragwirkung der einzelnen Scheiben und Platten wird durch fugenlosen Anschluß gewährleistet. *Schalen* sind dünnwandige Flächentragwerke, die einfach oder doppelt gekrümmt sein können. Einfach gekrümmte Schalen werden häufig als *Zylinderschalen* im Behälterbau oder liegend als tragende *Rohre* verwendet. In Form eines Halbkreises, einer Halbparabel oder Kettenlinie werden diese Tragwerke als *Tonnenschalen* bezeichnet. Sie können infolge der räumlichen Kräftewirkung auf 4 Stützen gelagert werden. Allerdings sind dann besondere Randglieder und Giebelscheiben notwendig. Das Schalensegment kann auch als *Sheddach* angewendet werden.

Schalen mit Doppelkrümmung können entweder als *Rotationsschalen*, z. B. Kuppelschalen, oder als *Translationsschalen* ausgeführt werden (Tafel 56).

Stahlleichtbeton ist ein schlaff bewehrter Beton mit dichtem Gefüge, der ganz oder teilweise unter Verwendung von Leichtzuschlagstoffen, wie *Blähton*, *Blähschiefer*, *Aggloporit*, hergestellt wird und dessen Trockenrohdichte ≈ 1200 bis 1800 kg/m^3 beträgt (vgl. 15.2.2.). Für Stahlleichtbeton gelten im Prinzip die gleichen Konstruktionsregeln wie für den Stahlbeton; Schwind- und Kriecherscheinungen sowie die Durchbiegung von Elementen sind jedoch größer. Er wird verwendet, wenn geringe Konstruktionseigenmassen erzielt werden sollen, z. B. Dachkonstruktionen über weitgespannten Hallen, bei Rekonstruktionsmaßnahmen und in Gebieten, die über keine geeigneten Zuschlagstoffe zur Herstellung von Schwerbeton verfügen.

Bewehrter Gasbeton. *Gasbeton* ist ein leichter, poriger Baustoff mit Festigkeiten zwischen 3 und 6 N/mm^2 und sehr guter Wärmedämmfähigkeit (vgl. 15.2.2.). Platten- und streifenförmige Elemente werden mit geschweißten Bewehrungsmatten aus glattem Rundstahl bewehrt. Die Bewehrungsmatten müssen mit Korrosionsschutz versehen werden. Bewehrte Gasbetonelemente werden vorwiegend als Wandelemente, jedoch auch als Dach- oder Deckenplatten für geringe Belastungen verwendet. In letzter Zeit werden Einzelelemente bereits im Herstellungswerk zu größeren Einheiten zusammengefügt und als geschoßhohe Wandplatten auf die Baustelle transportiert. Gasbeton darf nicht in Naßräumen und unter extrem trockenen Bedingungen eingesetzt werden.

Stahlsilikatbeton ist ein Beton aus Kalk, quarzhaltigem Sand und Wasser, dessen Härtung im

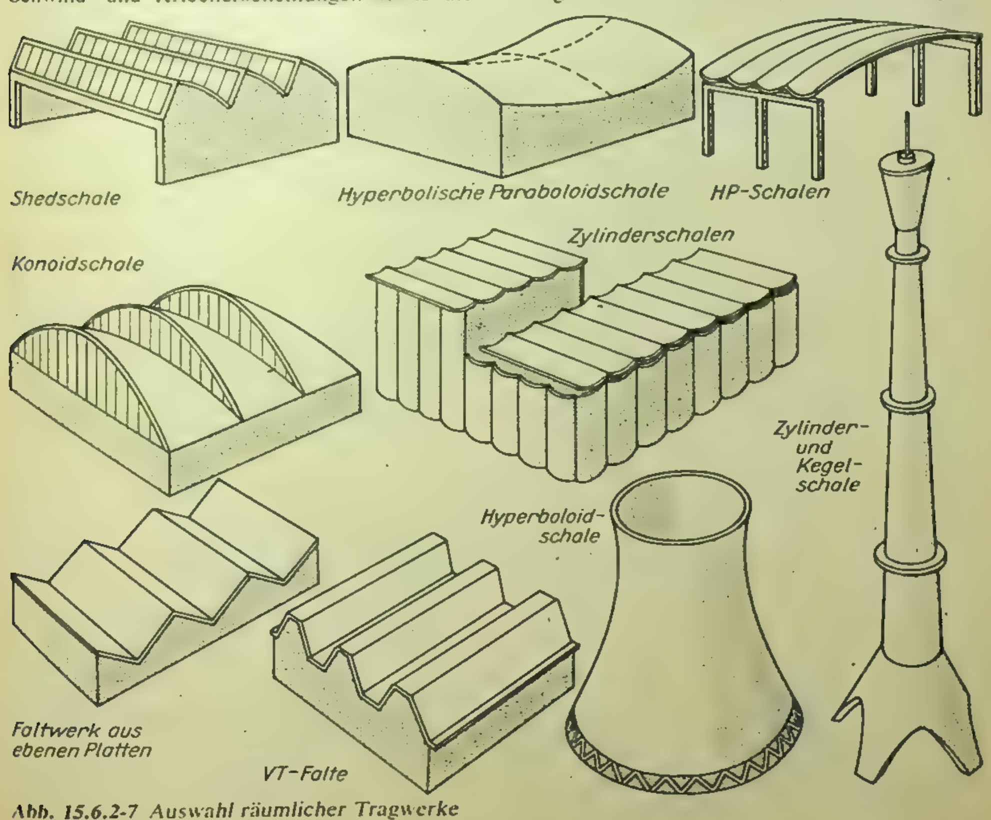


Abb. 15.6.2-7 Auswahl räumlicher Tragwerke

Autoklaven erfolgt. Er bietet außer der Zementeinsparung den Vorteil, daß keine klassierten Zuschlagstoffe und nur geringe Mengen Bindemittel erforderlich sind. Wie bei Zementbeton hat eine gute Verdichtung wesentlichen Einfluß auf Rohdichte und Festigkeit des Betons sowie den Korrosionsschutz der Bewehrung. Bei Rohdichten über 1800 kg/m³ korrodiert die Bewehrung im Silikatbeton i. allg. nicht. Stahlsilikatbeton wird für tragende und nichttragende Innenwandplatten, Rundlochdeckenplatten, Stützen, Balken u. a. angewendet.

Armozement ist ein mit feinmaschigen Drahtnetzen bewehrter Beton hoher Festigkeit und mit geringen Wanddicken. Er ist besonders geeignet für vorgefertigte Schalen und Falten, die zur Ableitung der Kräfte nur 15 bis 30 mm Dicke erfordern, die aber aus konstruktiven Gründen bei Verwendung von Stahlbeton dicker ausgeführt werden müßten.

15.6.3. Spannbetonbau

Wirkungsweise. Die Anwendung des gewöhnlichen Stahlbetons ist durch die geringe Zugfestigkeit des Betons begrenzt. Auftretende Zugkräfte werden zwar durch die Stahleinlagen in der Regel sicher aufgenommen, die im Beton entstehenden Haarrisse sind aber in vieler Hinsicht nachteilig. Sie verhindern die volle Ausnutzung der möglichen Stahlzug- und erreichbaren Betondruckfestigkeiten. Durch das Prinzip der Vorspannung wird ein Teil der Stahldehnungen vorweggenommen und die zur Vordehnung erforderlichen Kräfte als Druckkräfte in den Betonquerschnitt, insbesondere dessen Zugzone, eingetragen. Dadurch schaltet man die bei Belastung auftretenden Zugspannungen aus und vermeidet demzufolge Risse. Die Wirkung der Vorspannung kann nur durch hohe Stahlspannungen gesichert werden, da durch Schwinden und Kriechen des Betons Spannungsänderungen im Beton auftreten, die die Vorspannung verringern.

Für das Einleiten von Druckkräften in den Beton zum Zwecke der Vorspannung gibt es mehrere Möglichkeiten, wie z. B. Spannen der Drähte oder Spannstäbe durch Spannmaschinen, elektrothermisches Spannen der Drähte, selbsttätige Vorspannung der Drähte durch geschicktes Ausnutzen der Eigenmasse des Betonkörpers oder Verwendung von Quellzementen, die die Eigenschaft haben, beim Abbinden Verlängerungen des Betonelements zu erzeugen.

Bewehrung. An *Spannstahl* werden allgemein höhere Forderungen als an normalen Baustahl gestellt. Insbesondere betrifft das die Zug- und Dauerfestigkeit und die Elastizität. Seine Empfindlichkeit bei hohen Temperaturen soll gering

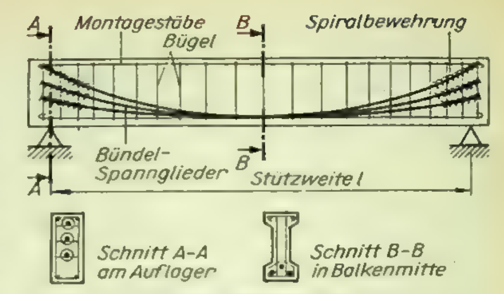


Abb. 15.6.3-1 Spannbetonbalken; die Spiralbewehrung dient zur Aufnahme der Querzugspannungen

und das Kriechen, die zeit- und spannungsabhängige plastische Dehnung, möglichst klein sein. Stahl mit hoher Festigkeit wird durch geeignete chemische Zusammensetzung, *Kaltziehen* oder ein entsprechendes *Vergüten* (vgl. 8.7.2.) erzeugt.

Mit Ausnahme von Fertigteilplatten und kleineren Balken ist für alle Spannbetonbauteile außer der Spannbewehrung auch schlaffe Bewehrung erforderlich (Abb. 15.6.3-1). Als Spannbewehrung werden Einzeldrähte, Stangen- oder Bündelbewehrung verwendet.

Die Anwendung von *Einzeldrähten* erfolgt ausschließlich beim Spannverfahren mit sofortigem Verbund. *Stangenbewehrung* wird überwiegend beim Freivorbau und für einige Fertigteile verwendet, da die Montage einfach erfolgen kann und die Stäbe durch einfache Muffenstöße beliebig verlängert werden können. Nachteilig ist die geringe Biegsamkeit der Stangenbewehrung. Bei der *Bündelbewehrung* werden Einzeldrähte in Hüllrohren zu Bündelspanngliedern mit bis 1 MN Vorspannkraft (Abb. 15.6.3-2) oder in Hüllkästen mit bis 450 Einzeldrähten und ≈ 16 MN Vorspannkraft vereinigt (Abb. 15.6.3-3).

Bündelspannglieder haben gegenüber der Stangenbewehrung den Vorteil größerer Biegsamkeit, Anpassungsfähigkeit der Vorspannkräfte durch variable Stabanzahl und -dicke, einfache Verankerung des festen Endes (*Besenverankerung*) und Erzeugung größerer Vorspannkräfte, haben aber den Nachteil, daß die Verankerung am Stabende kompliziert ist.

Bündelbewehrung wird beim Spannverfahren mit nachträglichem Verbund für viele Tragwerke des Hoch-, Tief- und Brückenbaus verwendet.

Spannverfahren. Ein grundsätzlicher Unterschied bei allen Spannverfahren besteht in der Art des Verbunds. Man unterscheidet Verfahren mit sofortigem, ohne und mit nachträglichem Verbund.

Verfahren mit sofortigem Verbund. Hierbei wird die erforderliche Bewehrung in Spannbetten, biegesteifen Schalungsformen oder Spannbahnen, vorgespannt und danach einbetoniert. Nach dem Erhärten des Betons wird die Vorspannkraft

durch Lösen der Verbindung am Widerlager auf den Beton übertragen. Eine besondere Verankerung der dabei verwendeten dünnen Drähte ist nicht erforderlich, da durch die relativ große Oberfläche der Drähte im Vergleich zu ihrem Querschnitt und die radialen Spannungen aus der Querverformung (*Hoyer-Effekt*) ausreichende Haftfestigkeit zwischen Spanndraht und Beton gewährleistet ist. Dieses Verfahren hat sich bei der Herstellung von Fertigteilen hervorragend bewährt und wird in Spannbetonwerken zur Herstellung von Deckenplatten, Balken, Masten, Pfählen, Eisenbahnschwellen usw. angewendet. Im Hinblick auf die sich ständig weiterentwikkelnde Montagebauweise wird in Zukunft der größte Teil des Spannbetons nach diesem Verfahren hergestellt werden.

Beim *Verfahren ohne Verbund* werden am erhärteten Betonkörper die vorgespannten Stähle oder Stahlseile in Gleitkanälen oder über Rollen geführt und gespannt.

Eine Verbindung mit dem Beton erfolgt nicht. Ein Vorteil besteht in der Möglichkeit, die Spannungsverluste aus Kriechen und Schwinden des

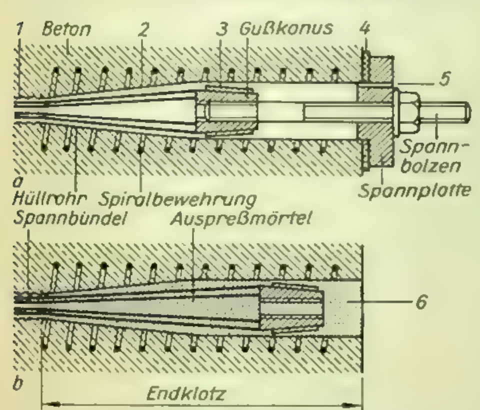


Abb. 15.6.3-2 Spannkopf eines 250 kN-Spannglieds: a vor dem Spannen, b nach dem Spannen und Auspressen. 1 Wellrohr, 2 trompetenartige Erweiterung des Hüllrohrs, 3 Manschette, 4 Gummidichtung, 5 Entlüftung bzw. Einpreßöffnung für Mörtel, 6 nach Ausschrauben des Spannbolzens mit Mörtel gefüllt

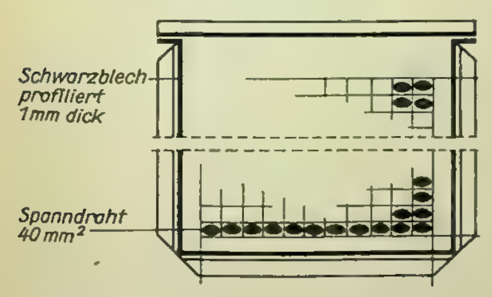


Abb. 15.6.3-3 Hüllkasten für Großbündelspannglieder

Betons durch Nachspannen zu kompensieren. Nachteilig sind die laufenden Unterhaltungsarbeiten durch Korrosionsschutzmaßnahmen. Das Verfahren wurde aus dem Prinzip des Hängewerks bzw. unterspannten Balkens entwickelt und vor allem im Brückenbau angewendet. Das Vorspannen erfolgt mit hydraulischen Pressen entweder am Balkenende durch Ziehen der Seile oder unter den Querträgern durch Herabdrücken und dadurch Vergrößerung des Seitenabstands.

Das Verfahren ohne Verbund wird nur noch selten angewendet, seitdem die Vorteile des Verfahrens mit nachträglichem Verbund bekannt sind, das eine Weiterentwicklung des Verfahrens ohne Verbund darstellt.

Verfahren mit nachträglichem Verbund. Die in Spannkanäle verlegte Stahlbewehrung wird nach ausreichender Erhärtung des Betons gespannt. Die Spannkanäle werden anschließend mit Zementmörtel ausgepreßt. Fast alle neueren monolithischen Spannbetonbauwerke werden mit nachträglichem Verbund ausgeführt. Die Anwendung erfolgt überwiegend im Brückenbau, bei weitgespannten Hallenbindern, Großbehältern u. a. Sowohl bei dem Spannverfahren ohne Verbund als auch beim Verfahren mit nachträglichem Verbund sind besondere Maßnahmen zur Verankerung der Spannstahlenden erforderlich (vgl. Abb. 15.6.3-2).

Spannleichtbeton ist ein mit vorgespannter Bewehrung versehener Beton mit dichtem Gefüge, der aus Leichtzuschlagstoffen (vgl. 15.2.2.) hergestellt wird und mindestens eine Trockenrohdichte von 1250 kg/m³ besitzt. Die Leichtzuschlagstoffe müssen eine genügend große Korneigenfestigkeit aufweisen, da sonst der Zementverbrauch zur Erzielung einer hohen Betonfestigkeit sehr groß ist. Kriechen und Schwinden ist gegenüber vergleichbaren Bauteilen aus vorgespanntem Schwerbeton größer. Spannleichtbeton wird daher vorwiegend für Bauteile mit großen Spannweiten angewendet, die nur geringe Eigenmassen besitzen sollen. Bei gleicher Festigkeit hat Spannleichtbeton eine um 30 bis 40% geringere Masse als vorgespannter Schwerbeton.

15.6.4. Bauweisen des Stahl- und Spannbetons

Ortbetonbauweise. Der Beton und die Bewehrung werden direkt am Standort des Bauwerks in eine Schalung, die durch ein Schalungsgerüst abgestützt ist, eingebracht (Tafel 56). Die geometrischen Abmessungen und die Form des Bauwerks können den statischen und architektonischen Forderungen weitgehend angepaßt werden. Ortbetonbauwerke haben eine sehr große

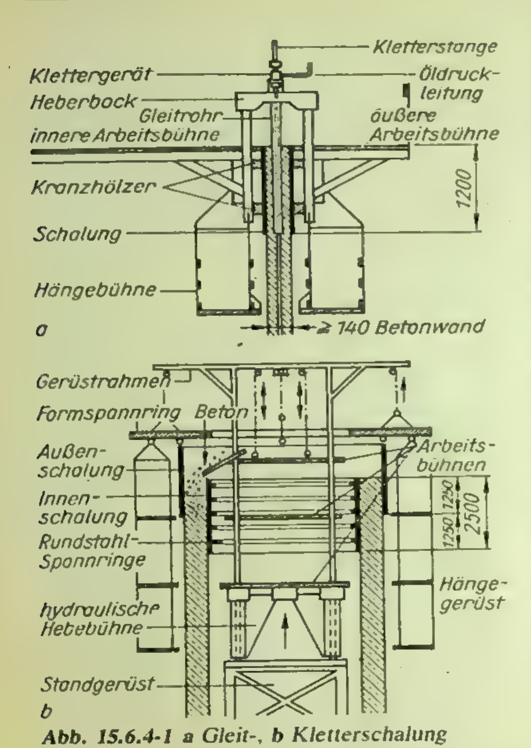


Abb. 15.6.4-1 *a Gleit-, b Kletterschalung*

Steifigkeit, da die Bewehrung einzelner Tragwerksteile in die angrenzenden Elemente übergreift. Die Verbindung der Bauteile ist einfach. Der hohe Schalungs- und Rüstungsaufwand und die Abhängigkeit von der Witterung sind Nachteile der Ortbetonbauweise. Bei neueren Schalverfahren wird der hohe Material- und Arbeitszeitaufwand der traditionellen Schaltechnik verringert. Für Decken und Balken werden *Schalungsträger* und *-stützen* aus Stahl verwendet, die einen oftmaligen Gebrauch und ein leichtes und schnelles Ein- und Ausschalen ermöglichen. Bei hohen Wänden werden aus dem gleichen Grund *Schalungshalter* eingesetzt. Das sind dünne, durch die Wand gehende Rundstahlstäbe, die mit Klemmen und Muttern an der Außenseite der Schalung arretiert werden. Für die Herstellung von Decken werden auch *Schalungstische* und für Wände biegesteife *Großtafelschalungen* angewendet. Die *Tunnelschalung*, eine Weiterentwicklung dieser großflächigen Schalungselemente, ermöglicht das gleichzeitige Einschalen von Decken und 2 Wänden. Der Einsatz erfolgt hauptsächlich im Wohnungs-, Gesellschafts- und Industriebau.

Gleit- und *Kletterschalung* (Abb. 15.6.4-1) wird für Sonderkonstruktionen, insbesondere turmartige Bauwerke, wie Schornsteine, Kühltürme, Silobauten, Treppenhauskerne im Hochhausbau usw., angewendet. Beim *Gleitbauverfahren* gleitet der Schalungskörper einschließlich der Arbeitsbühne und der Hängerüstung an stählernen Kletterstangen, die in die Bauwerkswand in 1,50 bis 2,50 m Abstand einbetoniert werden, empor. Die Kletterstangen werden nach oben ständig verlängert. Für den Hubvorgang sind Heberböcke und hydraulische Klettergeräte notwendig. Die stündliche Betonierleistung beträgt in Abhängigkeit von der Erhärtungsgeschwindigkeit 15 bis 20 cm Höhe. Seit einigen Jahren werden Großkühltürme mit hyperbolischer Form im Gleitbauverfahren hergestellt (Tafel 56). Am äußeren Umfang des Schalungskörpers befindet sich ein torsions- und biegesteifes Aussteifungssystem, das die Einhaltung der Kreisform bei sich ständig änderndem Kühlturmdurchmesser gewährleistet. An dem Aussteifungsring sind Heberböcke mit festen Schaltafeln, in den Feldern zwischen den Heberböcken lose, bewegliche Schaltafeln angeordnet. Über einen hydraulischen Antrieb kann durch Ringspindeln der

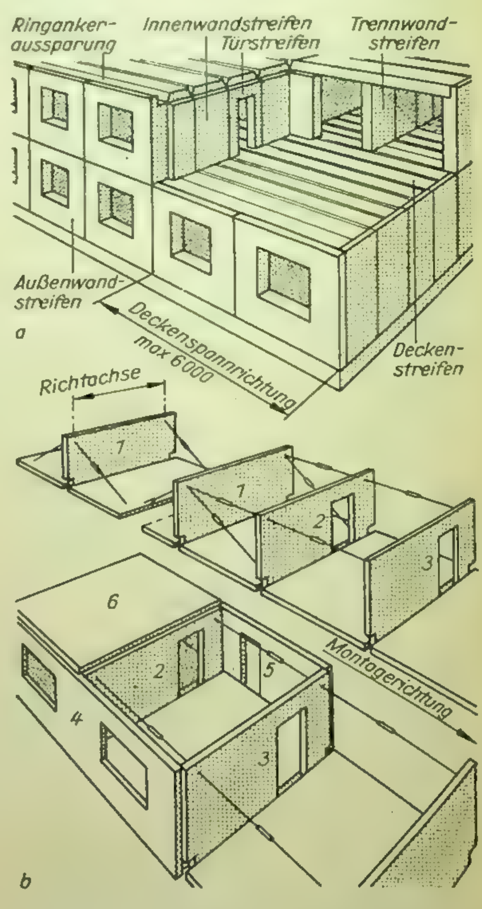


Abb. 15.6.4-2 *Wandbau in der 20 kN-(2 Mp-) und in der 90 kN-(9 Mp-) Bauweise*

Gleitschalungskörper bis ≈ 40 % zusammengezogen werden.
Die *Kletterschalung* benötigt im Unterschied zur Gleitschalung ein Innengerüst über die gesamte Bauwerkshöhe, das nach dem Hubvorgang einer Hebebühne jeweils nach oben verlängert wird. Die Schalung wird absatzweise bewegt. Dabei wird die an einem Formspannring hängende Außenschalung nach dem Erhärten des Betons um jeweils 2,50 m gehoben, die zweiteilige Innenschalung wird, sich gegenseitig überspringend, nach oben versetzt und durch Rundstangenringe innen verspannt. An einem Tag können 2,50 m hohe Abschnitte betoniert werden. Bei Betonstaumauern wird die Kletterschalung im Bereich ihrer unteren Hälfte von einbetonierten Stahlankern getragen, die obere Hälfte kragt frei nach oben. Nach Betoneinbau und -erhärtung werden die gut ausgesteiften Kletterschalungstafeln nach oben versetzt und neu verankert.
Fertigteilbauweise. Bei der Fertigteil- oder Montagebauweise im Betonbau werden vorgefertigte, erhärtete Beton-, Stahlbeton- oder Spannbetonelemente, wie Platten, Balken, Stützen u. a., zum Bauobjekt transportiert und mittels eines Krans montiert (Tafel 55). Die Vorteile der Fertigteilbauweise sind weitgehend witterungsunabhängige Herstellung der Bauelemente, geringerer Aufwand für die Baustelleneinrichtung, Einsparung von Schalungen und Rüstungen auf der Baustelle, geringere Schwinderscheinungen und Verkürzung der Bauzeit. Durch die Verlagerung der Herstellung der Bauelemente von der Baustelle in ortsfeste Betonwerke besteht die Möglichkeit, die Teilprozesse Betonbereitung (Mischen, Dosieren, Transportieren, Einbringen in

die Schalung, Verdichten), Bewehrungsbau (Richten, Schweißen usw.), Schalungsbau besser zu mechanisieren und zu automatisieren als auf der Baustelle. Die aufwendigen Stahlschalungen erfordern eine Begrenzung des Elementesortiments und eine Typisierung der Elemente.
Bei der *Skelettbauweise* werden die Lasten der Decken über Balken und Säulen abgeleitet. Balken und Säulen bilden ein tragendes Skelett: Die Wände üben keine tragende Funktion aus. Sie dienen lediglich als Raumabschluß mit wärme- und schalldämmender Wirkung.
Bei der *Großtafel-* oder *Plattenbauweise* (Tafel 55) werden raumhohe und -breite Wandscheiben mit Deckenplatten zusammengefügt (Abb. 15.6.4-2). Tragende Balken und Säulen sind nicht vorhanden, die Deckenlasten werden über die Wände abgeleitet. Die Größe der Bauelemente und damit die Laststufen richten sich nach dem Grundriß und der Geschoßhöhe.
Raumzellenbauweise (Abb. 15.6.4-3) ist die Vorfertigung mehrseitig geschlossener Baukörper. Die Raumzelle wird in Trog- oder Glockenform in zentralen Fertigungswerken gegossen oder am Bauplatz aus Fertigteilplatten hoher Laststufe zusammengesetzt und mit Hilfe eines Krans montiert. Bei zentraler Fertigung sind die Abmessungen der Raumzellen durch die Transportmittel begrenzt. Raumzellen können auch mit Großplatten kombiniert werden. Der Einbau von Sanitäranlagen, Rohrleitungen usw. wird in der Regel bereits in der Vorfertigung vorgenommen. Auf der Baustelle werden lediglich die Installa-

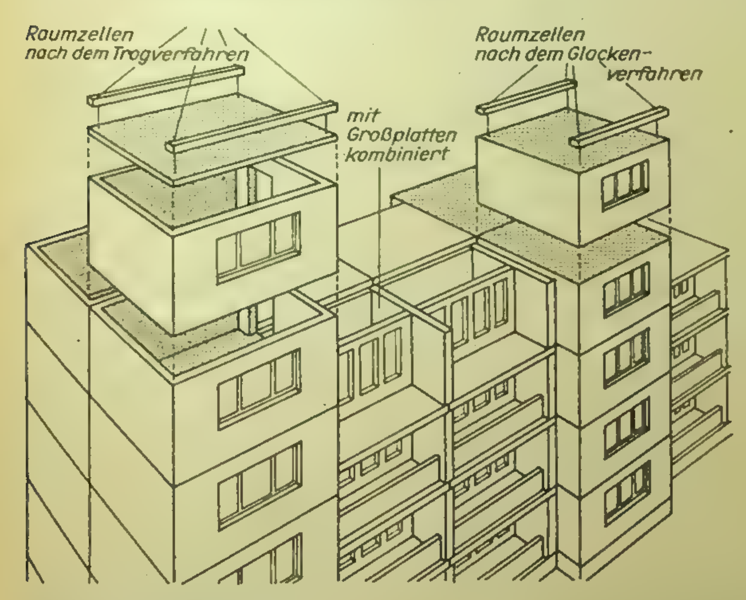


Abb. 15.6.4-3 *Wohnhaus aus Raumzellen: **a** nach dem Trog-, **b** Glockenverfahren hergestellt, **c** kombiniert mit Großplatten*

tionsanschlüsse hergestellt, so daß nur sehr kurze Bauzeiten erforderlich sind.
Beim *Lift-Slab-* bzw. *Plattenhubverfahren* werden zuerst die Stützsäulen des Bauwerks hergestellt. Danach werden die Geschoßdecken am Boden übereinander betoniert. Zur Trennung der einzelnen Lagen wird z. B. Wachs aufgestrichen. Mit Hubpressen werden die Deckenplatten dann gehoben und an den Säulen befestigt. Beim *Geschoßhubverfahren* werden ganze Geschosse hochgezogen und die Gebäude von oben nach unten errichtet.
Mischbauweise. Sie stellt eine Kombination von Montage- und Ortbetonbauweise dar. Dabei werden mit Stahlbetonfertigteilen montierte Bauwerke durch Ortbeton verstärkt, die Fertigteile dienen häufig dem Ortbeton als Schalung. Es lassen sich dadurch Gebäudesteifigkeiten erzielen, die einer Ausführung in Ortbeton gleichkommen. Im Hochhausbau werden häufig Teile des Bauwerks monolithisch in Gleitbauweise ausgeführt, während die restlichen Baukörper aus Fertigteilen errichtet werden. Die monolithischen Gebäudeteile dienen meist als Treppenhäuser, Aufzugs-, Heizungs- und Lüftungsschächte. Sie sind der gebäudestabilisierende Kern des Bauwerks, der alle horizontalen Lasten, wie Wind-, Erdbebenlasten usw., aufnimmt.

15.7. Stahlbau

15.7.1. Vorteile der Stahlbauweise

Der *Stahlbau*, eine Bauweise für Tragkonstruktionen des Ingenieurbaus, umfaßt Bauwerke, die vorwiegend aus warmgewalzten oder kaltgeformten Stahlprofilen und -blechen zusammengesetzt sind. Die hohe Festigkeit des Stahls ermöglicht schlanke Tragkonstruktionen mit niedrigen Eigenlasten, günstiger Elastizität und genügendem plastischem Formänderungsvermögen als Schutz gegen örtliche Spannungsspitzen und Sprödbruchgefahr. Gute Bearbeitungs- und vielfältige Verbindungsmöglichkeiten ergeben einen großen Spielraum der konstruktiven Durchbildung und führen zu variablen Fertigungsbedingungen. Zunehmend wird die Fließfertigung einheitlicher Elemente auf Taktstraßen angewandt. Durch geringe Eigenlasten bedingte sparsame Gründungen, maßgenaue, schnelle Montage, z. T. großer, vorgefertigter, durch Ausbau- bzw. Ausrüstungsteile komplettierter Segmente, wirken sich kosten- und zeitsparend aus. Verstärkungen, Umbauten und Rekonstruktionen lassen sich verhältnismäßig leicht durchführen, meist auch mit weitgehender Aufrechterhaltung oder nur kurzer Unterbrechung der Nutzung des Bauwerks. Stahlkonstruktionen können demontiert und an anderer Stelle wieder aufgebaut werden. Nicht zu unterschätzen ist auch der Umstand, daß bei Abbruch der Schrott als wertvoller Rohstoff zurückgewonnen wird.
Korrosions- und Brandschutz. Die normalen Baustähle müssen gegen Korrosion geschützt werden. Die erforderliche Konservierung wird zunehmend in die Fertigung verlegt, so daß immer mehr Stahlkonstruktionen mit Vollkonservierung auf die Baustelle geliefert werden. Am haltbarsten sind metallische Überzüge. Stahlleichtkonstruktionen werden daher bevorzugt durch Verzinken geschützt (vgl. 8.8.7.). Für andere Konstruktionen verwendet man vorwiegend Schutzanstriche (vgl. 8.8.5.), die entsprechend den aggressiven Medien (z. B. Industrie-, Meeresluft, Rauchgase) nach vorheriger Oberflächenvorbehandlung als mehrschichtige Anstrichsysteme aufgebracht werden. In aggressiver Industrieluft halten Schutzanstriche nur wenige Jahre. Um die erheblichen Kosten der Anstricherneuerung einzusparen, werden für korrosionsgefährdete Konstruktionen in zunehmendem Maße *korrosionsträge Stähle* eingesetzt.

15.7.2. Elemente des Stahlbaus

Walzerzeugnisse für den Stahlbau sind Walzprofile mit I-, ⊏-, T-, L-Querschnitt, Rohre, Bleche, Flach-, Breitflach-, Band-, Quadrat- und Rundstähle, Stahlseile, Sonderwalzprofile und Profilbleche (Riffel-, Warzen- und Waffelbleche). Für den Stahlleichtbau werden daneben noch kaltgeformte, dünnwandige Profile hergestellt, die auf Profiliermaschinen aus Bandstahl gefertigt werden.
Verbindungsmittel (vgl. 8.4.). *Nietverbindungen* sind in den letzten Jahrzehnten fast völlig durch Schweißverbindungen verdrängt worden.
Schrauben werden bevorzugt für Montageverbindungen und zum provisorischen Zusammenbau verwendet. Zunehmend benutzt man hochfeste Schrauben (*HV-Schrauben*, Abkürzung für *h*ochfest *v*orgespannt), die aus Werkstoff mit hoher Zugfestigkeit bestehen, mit Hilfe eines *Drehmomentschlüssels* vorgespannt werden und eine flächenhafte Kraftübertragung durch Reibungswiderstand zwischen den verbundenen Teilen gewährleisten.
Schweißen ist die häufigste Verbindungsart im Stahlbau (vgl. 8.4.2.).
Klebeverbindungen werden bisher noch wenig verwendet. Gute Erfahrungen mit vorgespannten *K*lebeverbindungen (*VK-Verbindungen*, Kombination von Kleber auf Kunstharzbasis und HV-Schrauben) liegen im Brückenbau vor.
Zug- und Druckstäbe kommen als Elemente in Fachwerkssystemen, als Ankerstäbe oder Stützen vor. Gleichmäßig über den Querschnitt ver-

teilte Spannungen treten auf, wenn die Wirkungslinie der Stabkraft mit der Stabachse zusammenfällt. Oft treten ungewollte oder planmäßige Außermittigkeiten oder Querlasten auf, die zusätzliche Biegespannungen hervorrufen. Ihr Einfluß ist bei den erforderlichen Nachweisen zu beachten. Bei Druckstäben besteht die Gefahr der Instabilität, d. h. des Versagens durch seitliches Ausweichen, Verdrehen oder die Kombination beider Ausweichformen (Biege-, Drill-, Biegedrillknicken). Für Druckstäbe sind daher Querschnitte mit großer Biege- und ausreichender Drillsteifigkeit (Abb. 15.7.2-1) notwendig.

Biegeträger weisen eine ungleichmäßige Spannungsverteilung über den Querschnitt auf und erleiden daher eine Krümmung der Stabachse. Während i. allg. die zulässige Spannung maßgebend ist, kann es bei weitgespannten Trägern auch die zulässige Durchbiegung sein. Instabilität von Trägern tritt in Form des Kippens (seitliches Ausweichen des Druckgurtes, verbunden mit Verdrehung um die Längsachse) auf. Die erforderliche Kippsicherheit wird durch biegesteife Ausbildung des Druckgurtes, Verbände o. a. konstruktive Maßnahmen erreicht.

Vollwandträger (Abb. 15.7.2-2) sind aus Stegblech und Gurtplatten zusammengesetzt. Bei genieteten Trägern sind zur Verbindung von Gurt und Steg Gurtwinkel erforderlich.

Hohlkastenträger eignen sich wegen ihrer großen Torsionssteifigkeit als Brückenhauptträger, Kranbahnträger u. a., bei denen Biege- und Verdrehbeanspruchungen auftreten. Für das Stegblech besteht die Gefahr des *Ausbeulens* infolge Schub- und Druckspannungen. Durch Steifen wird die Beulsicherheit erhöht. Trägerstöße und -anschlüsse werden geschweißt oder geschraubt ausgebildet.

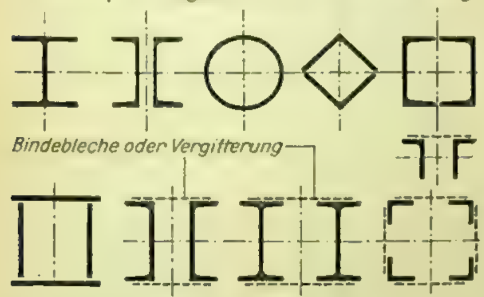


Abb. 15.7.2-1 Querschnitt für ein- und mehrteilige Druckstäbe

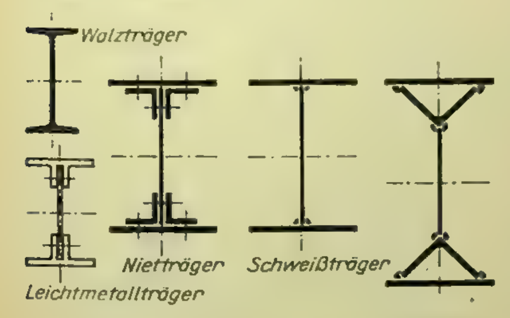


Abb. 15.7.2-2 Querschnitt von Vollwandträgern

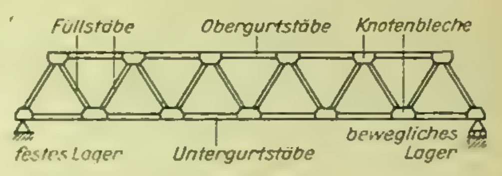


Abb. 15.7.2-3 Fachwerkträger

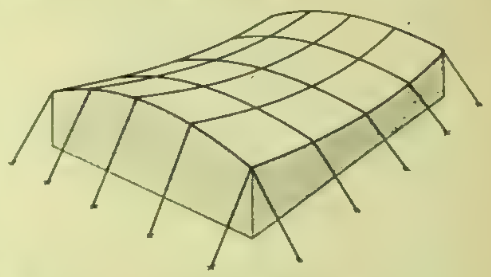


Abb. 15.7.2-4 Doppelt gekrümmtes, seilverspanntes Dach

Fachwerkträger (Abb. 15.7.2-3) bestehen aus Gurt- und Füllstäben. Die Füllstäbe können direkt oder über *Knotenbleche* mit den Gurtstäben verbunden werden. Nach der Anzahl der Knotenblechebenen unterscheidet man ein- und zweiwandige Fachwerke. Letztere eignen sich für große Stabkräfte, z. B. bei Brückenhauptträgern.

Flächentragwerke nehmen Belastungen quer zu ihrer Ebene auf. Im Stahlbau zählen dazu z. B. Fahrbahntafeln von Brücken aus versteiften Flachblechen (*orthotrope Platten*), Dacheindeckungen und wandartige Tafeln, die aus Well-, Trapez- oder Schalenprofilblechen oder aus Blechen mit Abkantungen und/oder Sicken bestehen. *Trägerroste* und *Stabnetzwerke* sind Stabtragwerke, die dem Tragverhalten von Flächentragwerken (Platten, Schalen) sehr nahe kommen. *Seiltragwerke* als Hänge- und Schrägseilbrücken, *Seilbinder*, einfach und doppeltgekrümmte seilverspannte Dächer (Abb. 15.7.2-4) sind für die entsprechenden Anwendungsbereiche aufgrund des geringen Stahlaufwands sehr wirtschaftlich.

Auflager und Gelenke. *Auflager* übertragen die konzentrierten Auflagerkräfte vom Tragwerk in den Unterbau. Sie sind daher hohen Beanspruchungen ausgesetzt und müssen die durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Verschiebungen und Verdrehungen an Auflagerstellen ohne Zwang ermöglichen. Große Auflagerkräfte treten besonders bei Stahlbrücken auf,

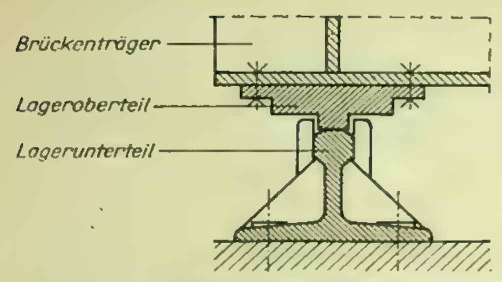


Abb. 15.7.2-5 Festes Linienkipplager

so daß die Lagerkörper aus Material mit hoher Druckfestigkeit und die Berührungsflächen nach den Prinzipien Walze gegen Ebene bzw. Kugel gegen Ebene gestaltet werden. Bei *Punktkipplagern* erfolgt die Kraftübertragung an der Berührungsstelle zwischen Lagerober- und -unterteil punktartig, während bei *Linienkipplagern* (Abb. 15.7.2-5) eine Berührungslinie wirksam wird. Günstige Eigenschaften weisen auch *Gummischichten-* und *-topflager* auf.

Gelenke gewährleisten die Verdrehbarkeit von Konstruktionsteilen bei gesicherter Übertragung von Längs- und Querkräften. Gelenke sind erforderlich, um das der Berechnung zugrunde liegende statische System konstruktiv zu realisieren. Bei statisch bestimmten Gelenksystemen sind auch größere Verschiebungen, z. B. infolge Baugrundsenkung, ohne Zwängungsspannungen im Bauwerk möglich.

15.7.3. Teilgebiete des Stahlbaus

Stahlhochbau. Bei ein- und mehrgeschossigen Gebäuden – z. B. Produktions- und Verwaltungsgebäude, Lager und Kaufhäuser, Schulen, Hotels, Krankenhäuser – werden Decken und Dachträger (Pfetten), Unterzüge, Geschoßstützen, Balkon-, Podest- und Treppenwangenträger sowie Dachbinder aus Stahl zusammen mit Massivbauteilen für Wände, Decken usw. verwendet.

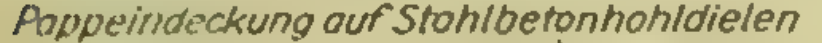
Stahlhallen besitzen eine für alle lot- und waagerechten Lasten tragfähige und stabile stählerne Tragkonstruktion (Tafel 57). Die Stabilisierung in Querrichtung erfolgt durch das *Haupttragwerk* (eingespannte Stützen, Zweigelenk- oder eingespannte Rahmen), in den Giebelwänden meist durch Verbände. *Wind-* und erforderlichenfalls *Bremsverbände* oder *-portale* übernehmen die Aussteifung und Aufnahme der Kräfte in Hallenlängsrichtung. Falls keine schubsteife Dacheindeckung vorliegt, müssen auch in der Dachebene Verbände angeordnet werden. Industriehallen werden meist mit Brückenkranen ausgerüstet. Produktionshallen der Textilindustrie werden oft mit Sheddächern (Abb. 15.7.3-1) ausgeführt, die eine sehr gleichmäßige Tageslichtbeleuchtung ermöglichen.

Flugzeug-, Fahrzeug-, Bahnhofs-, Ausstellungs- und Sporthallen stellen meist funktionsbedingte Sonderlösungen dar, während für Industriehallen getypte Angebotsprojekte vorliegen. Neben reinen Stahlhallen werden auch gemischte Konstruktionen mit Stahlbetonstützen und Dachtragwerken in Stahl- oder Stahlverbundkonstruktion ausgeführt.

Stahlskelettbauten sind mehr- oder vielgeschossige Bauwerke, deren stählernes Traggerüst (Skelett), bestehend aus Stielen, Riegeln, Dekken- und Dachträgern sowie Verbänden, alle Eigen-, Nutz- und Windlasten aufnimmt und in die Gründungen ableitet (Tafel 57). Die Wände haben keine tragende Funktion, sondern erfüllen die bauphysikalischen Bedingungen des Wärme-, Schall- und Feuchtigkeitsschutzes. Sie werden meist als vorgefertigte montierbare Elemente hergestellt. Die Fassaden werden oft mit profilierten Leichtmetall- oder beschichteten Stahlblechen als *Wetterschutzschale* verkleidet, die z. T. durch Lichtbänder oder Fenster unterbrochen werden (Tafel 57). Die Decken werden in Stahlverbundbauweise oder als masse- und bauzeitsparende Stahlzellen- oder Stahlleichtträgerdecken gefertigt.

In statischer Hinsicht unterscheidet man *Vollsteifrahmen* mit biegesteifen Verbindungen zwischen Stielen und Riegeln, *Gelenkrahmen* mit aussteifenden Verbänden und Mischsysteme. Vom Konstruktionssystem her unterscheidet man Skelette mit durchgehenden Stützen und solche mit stählernem oder massivem *Kernbauwerk* und hängenden oder auskragenden Geschossen. Mischkonstruktionen von Massiv- und Stahlskelettabschnitten in verschiedenen Varianten sind möglich.

Die Stahlskelettbauweise bietet u. a. die Vorteile, daß die Stützen und Träger aufgrund der hohen Festigkeitswerte von Stahl geringe Abmessungen haben können und damit eine gute Raumausnutzung ermöglichen sowie infolge ihrer geringen Eigenlast verhältnismäßig kleine Fundamente erfordern. Dadurch sind auch Gebäude extremer Höhe (gegenwärtig beispielsweise ein Verwaltungshochhaus mit ≈ 400 m) möglich. Ein weiterer Vorzug der Stahlskelettbauweise ist die verhältnismäßig kurze Montage-



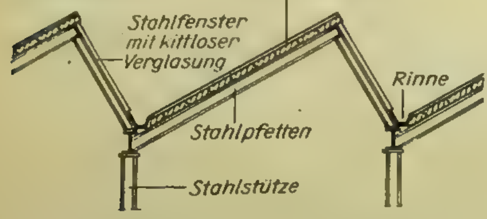


Abb. 15.7.3-1 Shedhalle mit schräger Verglasung

zeit (z. B. für ein ≈ 100 m hohes Verwaltungsgebäude mit einem Stahlaufwand von 2400 t nur 7 Monate).

Stahlbrücken. Der Stahlüberbau überspannt das Hindernis und überträgt die Eigen- und Verkehrslasten auf den *Unterbau* (Widerlager, Pfeiler, Fundamente), der die Auflagekräfte in den Baugrund leitet. Zum *Überbau* gehören Fahrbahn (bzw. Kanalbett, Gerinne, Fördereinrichtung, Rohrleitung, Energiekabel), Haupttragkonstruktion, Verbände, Lager und Ausrüstungen.

Belastungen. Neben der statischen Beanspruchung aus ruhenden Lasten erzeugen die *Verkehrslasten* auch dynamische (schwingende) Beanspruchungen. Außer dem allgemeinen Spannungs- und dem Stabilitätsnachweis ist daher die Ermüdungsfestigkeit nachzuweisen. Auch *Fliehkräfte* (bei Brücken in Krümmungen), *Bremskräfte*, *Kräfte aus Temperaturänderungen*, *Winddruck* und *Verschiebungen von Auflagerpunkten* (z. B. durch Setzungen der Widerlager und Pfeiler bei schlechtem Baugrund) sind zu berücksichtigen.

Fahrbahn. *Eisenbahnbrücken* besitzen entweder eine *offene Fahrbahn*, bestehend aus einem System von Längs- und Querträgern, oder eine *geschlossene Fahrbahn* mit durchgehendem Schotterbett bzw. als Flachblech mit elastischer Schienenbefestigung (Gummiplatten unter den Schienenauflagern) ausgebildet. Bei *Straßenbrücken* werden die früher vorherrschenden

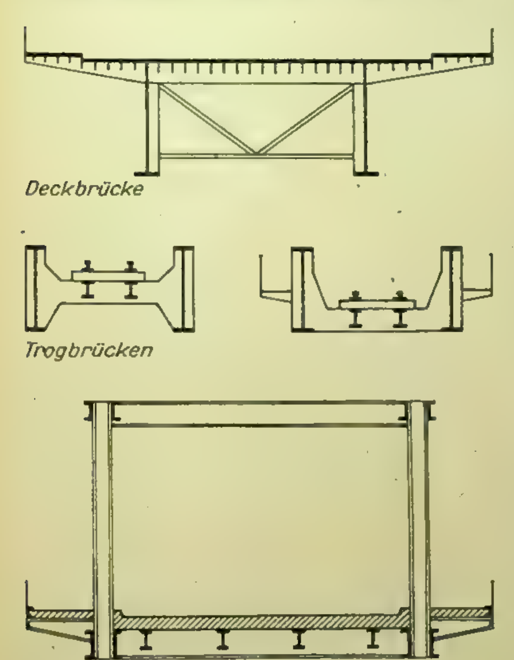


Abb. 15.7.3-2 Lage der Fahrbahn bei Brücken

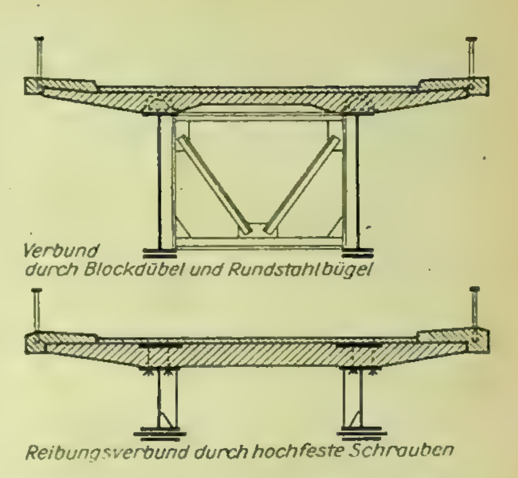


Abb. 15.7.3-3 Stahlverbundkonstruktionen

Schwerfahrbahnen (Pflasterung mit Kiesbett auf Belagstahl, Buckel- oder Tonnenblechen oder auf Stahlbetonplatten unterstützt durch ein Trägerrost) zunehmend durch leichtere Konstruktionen, z. B. Stahlverbundfahrbahnen oder Stahlleichtfahrbahnen (durch Längs- und Querrippen versteiftes Fahrbahnblech — orthotrope Platte), mit Asphaltbelag abgelöst. Bei ausreichender Bauhöhe wird die Fahrbahn über dem Haupttragwerk angeordet (*Deckbrücke*), andernfalls liegt sie zwischen den Hauptträgern (*Trogbrücke*) (Abb. 15.7.3-2). Für das *Haupttragwerk* sind unter Berücksichtigung ästhetischer, funktioneller, konstruktiver, technologischer und ökonomischer Gesichtspunkte das *statische System* (s. u.) und das *Konstruktionssystem* (Vollwand-, Fachwerk-, Stahlverbundkonstruktion) festzulegen (Abb. 15.7.3-3). Bei vollwandigen Balkentragwerken werden vielfach ein- oder mehrzellige Hohlkästen angewandt, die wegen ihrer großen Torsionssteifigkeit auch für im Grundriß gekrümmte Überbauten besonders geeignet sind.

Räumliche Stabilisierung wird durch Verbände erreicht. Die horizontalen Kräfte werden in Querrichtung vom *Wind-* und *Schlingerverband*, in Längsrichtung vom *Bremsverband* abgeleitet. *Querverbände* sichern die Unverschieblichkeit der Querschnittsform des Überbaus. Bei zwischenliegender Fahrbahn werden sie durch Rahmen ersetzt. Kleinere Hohlkästen erhalten Querschotte.

Brückensysteme. Balkenbrücken (Abb. 15.7.3-4, a-c) werden für kleine und mittlere Stützweiten auch aus technischen und ökonomischen Gründen bevorzugt. Die Balkenhöhe in Feldmitte liegt zwischen $^1/_{10}$ (Einfeldfachwerkträger) und $^1/_{62}$ (durchlaufender Kastenträger mit veränderlicher Steghöhe) der Stützweite. Die bisher größte

Stützweite erreicht die Mittelöffnung der dreifeldrigen Savebrücke in Belgrad mit 261 m.
Bei *Rahmenbrücken* (Abb. 15.7.3-4d) sind die Stützen mit dem Balken biegesteif verbunden, wodurch man dessen Höhe verringern kann.
Bei den *Schrägseilbrücken* (Abb. 15.7.3-4e, Tafel 57) werden die Balkenträger an einigen Punkten mit Schrägseilen gegen Pylone über den Pfeilern abgespannt. Stützweiten bis ≈ 350 m sind erreichbar.
Bogenbrücken (Abb. 15.7.3-4f) ermöglichen Stützweiten bis ≈ 500 m (Kill-van-Kull-Brücke, New York, 504,3 m). Sie erzeugen außer den vertikalen Stützkräften große horizontale Schubkräfte in den Widerlagern (Kämpfer).
Stabbogenbrücken (Abb. 15.7.3-4g) sind durch stetig gekrümmte oder als Polygonzug ausgebildete Stabbögen versteifte Balkenbrücken. Die Bogenschubkraft wird als Zugkraft in den Balkenträger eingeleitet und somit nicht in die Pfeiler übertragen.
Hängebrücken (Abb. 15.7.3-4h) lassen größte Stützweiten zu. Der Versteifungsträger wird mit lotrechten oder diagonalen Hängern an den *Tragkabeln* aufgehängt, die über die Sättel der Pylone laufen und im Erdreich bzw. am Versteifungsträger verankert sind.
Bewegliche Brücken werden z. B. im Bereich breiter Strommündungen (Hafenzufahrten) eingesetzt, wenn die hohen Aufbauten der Schiffe für die Brücke des kreuzenden Verkehrsweges eine sehr hohe Lage und damit auch lange und kostspielige Anrampungen erfordern würden. Man unterscheidet Hub-, Klapp-, Dreh- und Verschubbrücken (Abb. 15.7.3-5).
Maste und Türme. Freileitungs-, Licht-, Signalmaste u. a. werden aus Stahlrohr oder als Stahlfachwerk errichtet. *Funkmaste* erreichen Höhen von über 600 m (Konstantynow, Polen, 642 m), haben über die gesamte Höhe gleichbleibenden Querschnitt und werden mit *Pardunen* abgespannt (Abb. 15.7.3-6).
Freistehende Türme haben einen sich nach oben verjüngenden Querschnitt, ihre Verankerung erfolgt nur in den Fundamenten, z. B. beim Eiffelturm (Paris) mit 312 m Höhe.
Hydro- oder *Aquagloben* werden aus einer Stahlblech-Rohrsäule mit aufgesetzter Aluminium-

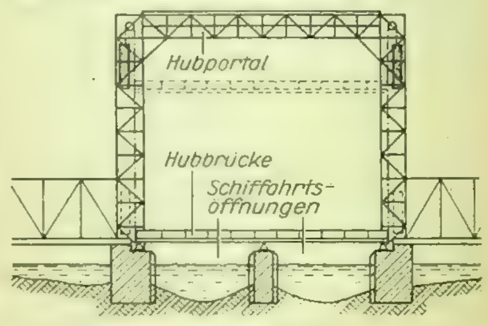


Abb. 15.7.3-5 *Bewegliche Brücke*

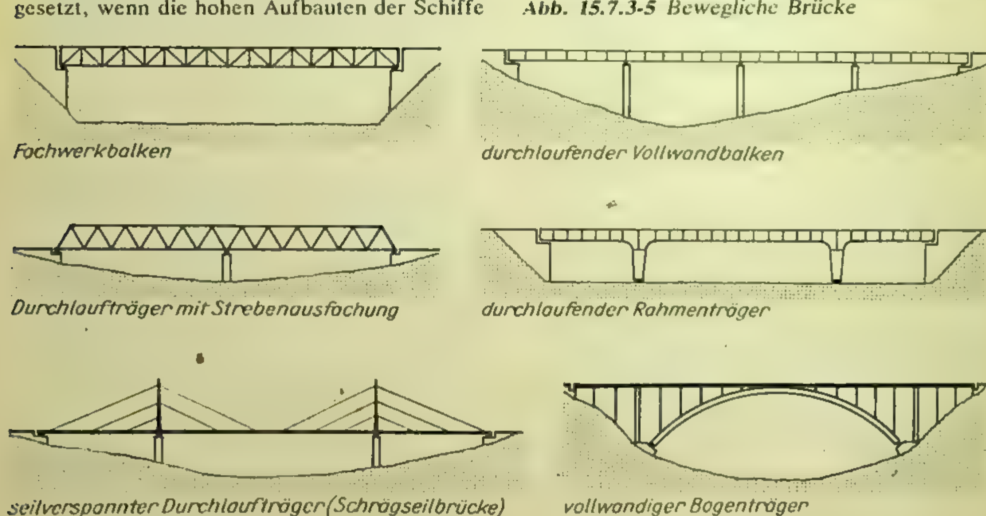




Abb. 15.7.3-4 *Stahlbrückensysteme*

blechkugel (Volumen bis 500 m³) errichtet und abgespannt.

15.7.4. Metalleichtbau

Die moderne Entwicklung des Stahlbaus im Sinne des leichten ökonomischen Bauens führt zu kompletten Gebäuden mit Trag- und großflächigen Hüllkonstruktionen aus Metall in Kombination mit anderen Baustoffen, die nach den Prinzipien des *Leichtbaus* konstruiert und in der Regel getypt sind. Der Metalleichtbau erreicht Vorteile gegenüber anderen Bauweisen durch Senkung der Montagezeiten, des Material-, Transport- und Fertigungsaufwands sowie der Kosten bei Erfüllung exakt definierter Gebrauchswerteigenschaften.

Stahlleichtbau ist durch Verwendung dünnwandiger Querschnitte (Kaltprofile, Rohre, versteifte Bleche), spezielle Verbindungen (Punktschweißen, Kleben, Klammern, Verschrauben mit Blech-, Schneid- und Bohrschrauben u. a.) und materialsparende Konstruktionen (z. B. Stabroste, Seiltragwerke, Stabnetzwerke, orthotrope Platten, Stahlzellendecken, Rohrkonstruktionen) gekennzeichnet.

Typische Anwendungsgebiete sind weitgespannte Dachkonstruktionen, Gewächshäuser, Industrie-, Kauf-, Schwimm- und Turnhallen, landwirtschaftliche Bergeräume und Stallbauten, Freiflächenüberdachungen, ein- und mehrgeschossige Bürogebäude.

Die dünnwandigen Querschnitte erfordern sorgfältige theoretische und experimentelle Nachweise der Tragsicherheit, der Stabilität und der Formänderungen. Mit der Feingliedrigkeit der Konstruktion nimmt die Bedeutung des Korrosionsschutzes zu. Dauerhafte Schutzüberzüge durch Verzinkung oder Plastbeschichtung werden daher gegenüber Schutzanstrichen bevorzugt (vgl. 8.8.).

Leichtmetallbau. Als Baustoff für Tragwerke werden sog. Konstruktionslegierungen – Aluminium, legiert mit Magnesium, Silizium, Kupfer – verwendet, deren Festigkeitswerte an die der normal- und mittelfesten Baustähle heranreichen (vgl. 15.2.3.). Infolge des niedrigen Elastizitätsmoduls ergeben sich allerdings bei gleicher Beanspruchung im Vergleich mit Stahl dreimal so große Formänderungen. Diesem Umstand begegnet man durch Querschnitte mit größeren Trägheitsmomenten. Das Strangpressen ermöglicht mit weniger Aufwand als beim Walzen, die Herstellung vielfältiger und auch komplizierter Profilformen. Leichtmetall zeichnet sich durch geringe Eigenlast (30% des Stahls) und gute Korrosionsbeständigkeit aus. Bei gemischter Konstruktion müssen Kontaktstellen mit Stahl u. a. Metallen isoliert werden, um elektrolytische Korrosion zu verhindern. Im Bauwesen wird Leichtmetall für Fassadenelemente, Dacheindeckungen, Fenster- und Türrahmen ver-

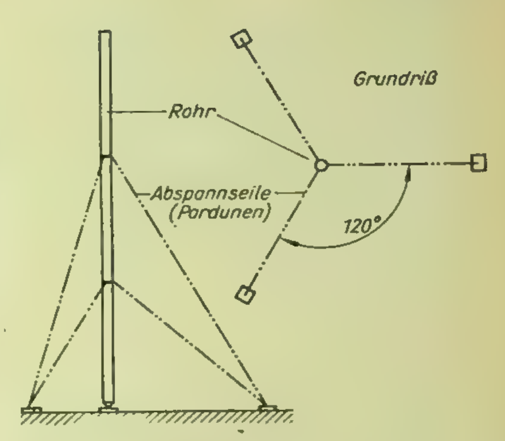


Abb. 15.7.3-6 Abgespannter Stahlrohrmast

wendet (vgl. 15.8.). In Tragkonstruktionen ist der Einsatz dort zweckmäßig, wo sich die geringe Eigenlast besonders günstig auswirkt, z. B. bei beweglichen Konstruktionen, wie Brückenbesichtigungswagen, Hub- und Klappbrücken, Antennentragwerke. In Einzelfällen wurden auch bereits Hallen, Geschoßbauten, Balken- und Bogenbrücken aus Leichtmetall errichtet. Der hohe Materialpreis, bedingt durch den großen Energieaufwand bei der Aluminiumerschmelzung (vgl. 3.3.5.), steht bisher einer umfassenden Verwendung im Bauwesen entgegen.

15.8. Ausbau

Der *Ausbau* umfaßt alle Konstruktionsteile, die den Rohbau eines Gebäudes zur fertigen Raumhülle vervollständigen, und alle dazu erforderlichen Prozesse, ohne daß Lasten des Rohbaus abgetragen werden.

Zum Ausbau zählen folgende *Bauwerksteile*: Dachdeckung, Hüllwände (leichte Außenwände), Trennwände, Fußböden, Unterdecken, Oberflächen, Be- und Verkleidungen, Verglasungen, Fenster, Türen, Wandöffnungsschutz (Gitter, Rolladen usw.), Geländer, Brüstungen. Die entsprechenden *Produktionsbereiche* bzw. *Gewerke* sind: Dachdecker, Klempner, Maurer, Putzer, Stukkateur, Fliesenleger, Fußbodenbahnenleger, Estrichleger, Parkettleger, Maler, Tapezierer, Tischler, Schlosser, Schmied, Glaser.

Die Effektivitätsreserven der traditionellen Ausbauproduktion – überwiegend manuelle Arbeiten – sind erschöpft. Die erforderliche Intensivierung muß durch verstärkte Industrialisierungsmaßnahmen herbeigeführt werden. Diese

Zielstellung muß vorrangig durch Verlagerung der Ausbauprozesse von der Baustelle in Vorfertigungsbetriebe erreicht werden, z. B. durch eine hohe Oberflächenqualität bei der Herstellung der Betonfertigteile für Wände und Decken. Weiterhin dienen diesem Ziel die Neuentwicklung und Rationalisierung von Baustellenprozessen und Ausbauteilen, z. B. Montierbarkeit, Austauschbau, industrielle Verbindungstechnik usw.

15.8.1. Dachdeckung

Die Hauptfunktion der Dachdeckung ist der Witterungsschutz des Gebäudes nach oben, also die Wasserdichtheit und -ableitung. Nebenfunktionen sind u. a. die Wärmedämmung, Dampfdiffusion, Betretbarkeit, Begehbarkeit. Die technische Lösung dieser Aufgabe hängt von der Art und Größe der Dachdeckungselemente, der Art und Anzahl der Fugen zwischen ihnen und der Dachneigung ab.
Die Realisierung der widersprüchlichen Funktionen erfordert einen stark gegliederten Schichten- und Schalenaufbau der Dachdeckung oder der gesamten Dachkonstruktion. Das sog. *Warmdach* vereint alle Schichten in einer Schale, wird also vom Gebäudeinneren erwärmt und ist deshalb kompliziert und schadensanfällig. Das sog. *Kaltdach* besteht aus der „warmen" Deckenschale über dem obersten Geschoß und der „kalten" Dachschale; beide Schalen sind durch einen der Luftzirkulation dienenden Zwischenraum getrennt, einem bekriech- oder begehbaren Bodenraum.
Schuppendeckung. *Schieferdeckung.* Die dünnen Naturschieferplatten werden im Verband als *altdeutsche* oder *Schablonendeckung* meist auf Holzschalung mit Stiften befestigt. Die Schieferdeckung ist in der DDR auf die Hochlagen des Erzgebirges und des Thüringer Waldes beschränkt. Wie Schablonenschiefer werden Asbestzementplatten verwendet.

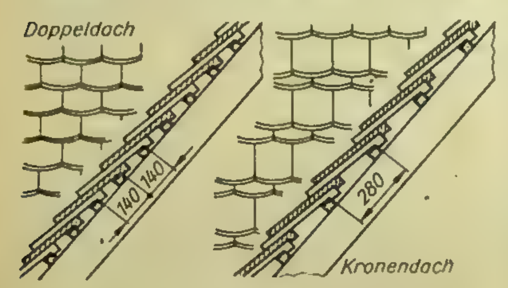
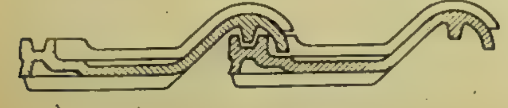


Abb. 15.8.1-1 Deckungsarten mit Platten (dach-) ziegeln (Biberschwänzen)


Abb. 15.8.1-2 Falzkremper

Ziegeldeckung, Betondachsteindeckung. Dachziegel sind Produkte der Grobkeramik; Betondachsteine werden auf Pressen hergestellt. Beide Arten werden mit Nasen auf Dachlatten eingehängt. Die Form der Dachziegel und Dachsteine bedingt die Fugenausbildung, den Dekkungsverband und gegebenenfalls auch die Vermörtelung.
Plattenziegel („*Biberschwänze*") werden wegen der offenen Fugen zweilagig eingedeckt (Doppel-, Ritter- oder Kronendach) und vermörtelt (Abb. 15.8.1-1).
Pfannen-, Falz-, Krempziegel überdecken sich einlagig mit einfachen oder aufwendigen Anschlußformen und bilden dadurch auch ohne Vermörtelung wasserdichte Fugen (Abb. 15.8.1-2).
Bahnendeckung. *Pappdeckung.* Die 1000 mm breiten Bahnen aus Teer- bzw. Bitumendachpappe oder Glasvliesbelag werden auf Holzschalung aufgenagelt oder mit heißer Klebemasse auf massive Grundflächen auf- und in beiden Fällen mehrlagig übereinandergeklebt. Das Kleben wird mit Hilfe spezieller Aufschmelzbeläge und -brenner vereinfacht und beschleunigt. Gegen Sonneneinstrahlung und Windsog wird auf die Bahnendeckungen eine Schutzschicht aus Splitt und Kies aufgeschüttet.
Foliendeckung. Als Bahnen oder großformatige Planen (bis 100 m²) werden einlagige, meist lose, nur an den Rändern verklebte oder verschweißte, mit einer Kiesschicht gesicherte Synthesekautschukfolien manuell verlegt. Vorteile sind die höhere Produktivität und längere Bestandsdauer.
Dämmdeckung. Bei dieser Warmdachdeckung befindet sich unter der Kiesschutzschicht und der Bahnendeckung eine *Dämmschicht* aus Holzwolle-Leichtbauplatten (HWL) (vgl. 7.3.4.), Gasßeton-, Schaumglasplatten o. a. Ein darunter geklebter Bahnenbelag als *Dampfsperre* vermindert eine Durchfeuchtung der Dämmschicht durch diffundierende Raumfeuchtigkeit. Diese wird durch eine mit Hohlräumen gebildete *Entspannungsschicht* abgeleitet.
Tafeldeckung. *Welltafeldeckung.* Großformatige Welltafeln (bis 2500 mm × 1000 mm) bestehen aus Asbestzement, bituminierter Wellpappe, glasfaserstrukturiertem ungesättigtem Polyester (GUP), Aluminium- oder Stahlblech. Die Montage von Welltafeln leitet die Dachdeckung von der handwerklichen in die industrielle Produktionsweise über (Abb. 15.8.1-3, Tafel 58).
Verbundtafeldeckung. Hierbei vereinen vorgefertigte, mehrschichtige Warmdachelemente die Schichten, die handwerklich bei Dämmdeckung einzeln auf die Dachfläche aufgebracht werden: Synthesekautschukfolie, PUR(Polyur-

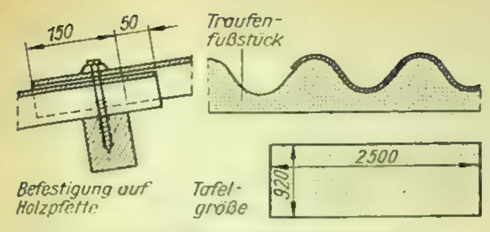
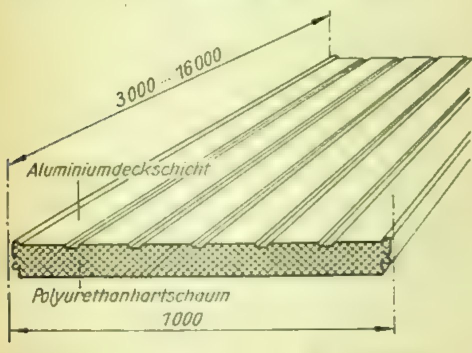


Abb. 15.8.1-3 Wellasbestzementdeckung



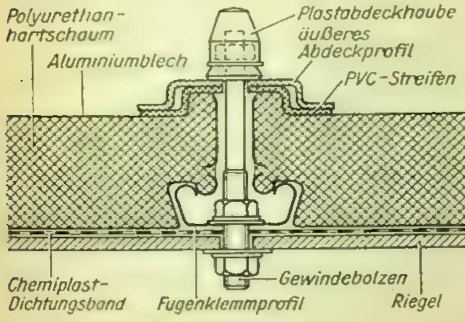


Abb. 15.8.1-4 Dachdeckung (ähnlich Außenwand) Stützkernelement Al-Pur-Al, unten Fugendichtung

ethan)-Hartschaum, Aluminiumfolie. Die Entspannungs- oder Diffusionsschicht wird durch kleine Kanäle unter der Dampfsperre gebildet. Selbsttragende großformatige Verbundtafeln (6000 bis 15000 mm × 1000 mm) werden als endlose Bänder produziert und abgelängt (Abb. 15.8.1-4).

Sonstige Deckungen. Bei der *Bitumen-Latex-Deckung* werden Ein- und Zweikomponentenemulsionen als großflächige fugenlose Schutz- oder Deckschichten aufgespritzt.

Metalldeckung. Deckungen aus Aluminiumfolien oder vollflächig aufgelegte Bleche aus Stahl, Aluminium oder Kupfer ähneln der Bahnendeckung, freitragende Wellbleche oder Profilbänder, wie z. B. beim „Hettal-Dach" (Abb. 15.8.1-5), der Tafeldeckung. Die Wärmedehnung wird z. B. durch Falze aufgenommen.

Komplettierte Stahlbetondachplatten. Entsprechend der strengen Ordnung der Systemmaße für den Wohnungsbau sind überfalzte Dachplatten und Trogdachplatten mit Fugenabdeckungen entwickelt worden, deren Oberfläche bereits im Betonwerk wasserdicht hergestellt wird, z. B. durch PUR-Anstriche.

Dachentwässerung. Die Elemente der äußeren Dachentwässerung – *Dachrinne* mit Traufblech, *Fallrohr* mit Einlaufstutzen – werden aus verzinktem Stahlblech, Aluminiumblech, PVC und Asbestzement hergestellt (Abb. 15.8.1-6). Die Dachinnenentwässerung erfolgt über *Einlauftöpfe* in Fallrohre aus PVC in Installationsschächten.

15.8.2. Hüllwand (leichte Außenwand)

Funktionell und systematisch gehören nichttragende Außenwände zum Ausbau. Produktionsbezogen müssen jedoch nichttragende Wände aus Beton, Leichtbeton, Leichtziegeln, sog. mittelschwere Wände, zum Rohbau gerechnet werden. Eigentliche Hüllwände sind daher die

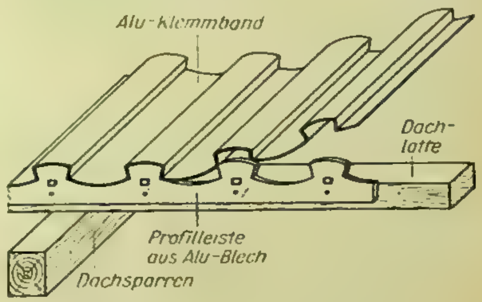


Abb. 15.8.1-5 „Hettal"-Dach (Hettstedter Aluminium-Klemmband-Deckung)

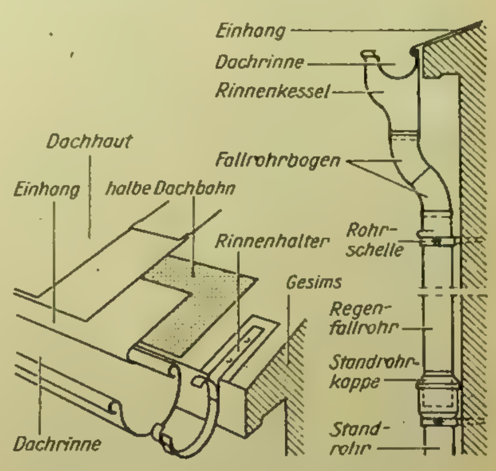


Abb. 15.8.1-6 Vorgehängte Dachrinne mit Regenfallrohr

sog. Vorhangwände, industriell komplett vorgefertigte und meist in die Geschoßdecken montierte äußere Raumabschlüsse.
Hüllwandarten. Geschoßhohe Elemente werden als Rahmen- und Halbsprossenkonstruktion aus Stahl und Aluminium mit hinterlüfteter Wetterschale aus Sicherheitsglas und mit Gipskarton-Innendeckschicht produziert.

15.8.3. Trennwand

Die Hauptfunktion der Trennwand ist die optische Raumabgrenzung und der Schallschutz. Nebenfunktionen sind die Wärmedämmung, der Feuchtigkeitsschutz, die Aufnahme von Installationen und die Versetzbarkeit (Demontierbarkeit).
Raumwandgroße Trennwandelemente müssen vor der Montage der raumabschließenden Decke aufgestellt werden. Im rohbaumäßig geschlossenen Raum wird die Trennwand aus Elementen oder in Ausnahmefällen monolithisch hergestellt. Die konstruktiven und technologischen Hauptprobleme sind in der industriellen Bauproduktion die Anschlüsse an die angrenzenden Wände, an den Fußboden und die Decke.
Wände aus kleinen Elementen werden mit Ziegeln oder Leichtbetonsteinen errichtet. Die Wandflächen werden im Regelfall geputzt. Die Prozesse sind handwerklich, die Baustellenfertigungszeit lang, der Schmutz- und Feuchtigkeitsanfall groß, die Kosten relativ niedrig.
Wände aus mittelgroßen Elementen ermöglichen eine höhere Arbeitsproduktivität als bei Ziegelwänden. Die Elemente haben die Abmessungen 1000 mm × 300 mm × 50 mm bis 100 mm und bestehen aus Schaum-, Schlackengips, Holz- oder Leichtbeton. Sie werden mit Mörtelfugen verbunden und müssen meist gespachtelt oder geputzt werden.
Tafelwände. Die Höhe oder Länge der Streifentafeln entspricht einem Raummaß (meist der Geschoßhöhe) oder dem Stützenabstand. Die Tafeln werden dabei direkt an den angrenzenden Bauteilen befestigt. Je nach der vom Baustoff (Schwer-, Leichtbeton, Gips, Verbundtafeln) abhängigen Masse werden die Tafeln manuell, mit Montagewagen oder Gabelstaplern montiert. Länge und Höhe der raumwandgroßen Tafeln stimmen mit den Raummaßen überein; diese Tafeln werden vom Hebezeug und für die Rohbaumontage versetzt. Trennwandtafeln sind oberflächenfertig oder werden höchstens gespachtelt.
Ständer-, Gerüstwand. In der Regel werden Holzsprossen oder Feinblech-U-Profile zwischen Fußbodenoberfläche und Deckenunterfläche aufgestellt. Die Wandflächen bilden die daran befestigten Trennwandtafeln oder Deckschich-

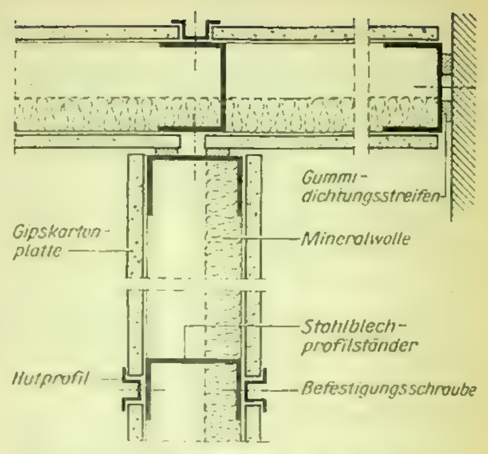


Abb. 15.8.3-1 Grundriß einer Trennwand in Ständerbauweise bis 4000 mm Höhe (Stahlblechprofilständer)

ten, z. B. Gipskartontafeln, zwischen denen Dämmschichten eingebracht werden können (Abb. 15.8.3-1).

15.8.4. Fußboden

Die Hauptfunktion des Fußbodens ist die Gehsicherheit bzw. Ebenheit, Nebenfunktionen sind u. a.: Abrieb-, Druckfestigkeit, Wasserdichtheit, Wärmedämmung, -ableitung, Schalldämmung, elektrischer Übergangswiderstand, Raumgestaltung.
Die vielseitigen und teilweise widersprüchlichen Funktionen erfordern einen unterschiedlichen, stark gegliederten Schichten- und Schalenaufbau. Der zweischalige oder sog. *„schwimmende" Fußboden* ist durch die trennende biegeweiche Schallschutz-Zwischenschicht gekennzeichnet (Abb. 15.8.4-1).
Fußbodenestrich. Plastische Massen aus Zementbeton, Anhydrit, Magnesit, Asphalt, Gips, Lehm werden zu monolithischen Fußbodenunter- und -nutzschichten verarbeitet. Durch Emulgierung

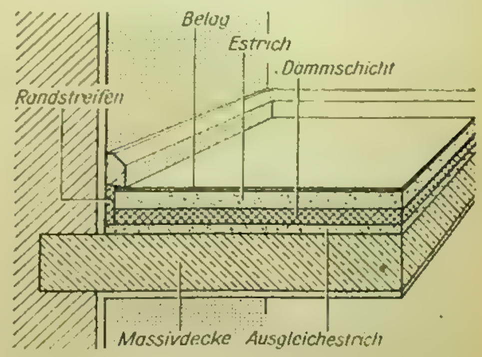


Abb. 15.8.4-1 Schwimmender Estrich

des Zementmörtels wird der Wasseranteil gesenkt und die Erhärtungszeit verkürzt. Plastifizierte Zement- und Anhydritmörtel, sog. *Fließestriche*, bilden mit nur geringer Glättung eine ebene Oberfläche. *Terrazzo* ist ein geschliffener Betonestrich mit gefärbtem Mörtel und ausgewählten Natursteinzuschlägen. Die *Hartbetonestriche* haben hohe Abriebfestigkeiten. Für die Herstellung von großflächigen Estrichen im Industriebau sind *Estrichfertiger*, ähnlich den Straßenfertigern, und geschlossene Maschinenkomplexe entwickelt worden.

Holzfußboden. Die Nutzschicht des Holzfußbodens wird von *Dielenbrettern*, *Parkettstäben* oder *-tafeln* bzw. *Furniertafeln* gebildet, die auf variablen Unterkonstruktionen befestigt werden.

Fußbodenbeläge sind Nutzschichten aus massiven Elementen, wie Klinker, Fliesen, Natur-, Betonwerkstein, oder flexiblen Elementen aus PVC, Gummi oder Linoleum, die z. T. in der Vorfertigung raumgroß zusammengeschweißt werden. Der Schall- und Wärmeschutz wird durch untergelegte oder angeformte Dämmschichten aus Schaum- oder Faserstoffen verbessert. *Spannteppich* ist ein hochwirksamer fußwarmer Trittschallschutz-Belag aus gespannter PVC-Folie auf Filzpappenunterlage. *Fußbodenspachtelbeläge* aus Plaste mit und ohne Füllstoffen werden meist mehrschichtig aufgespachtelt oder -gespritzt. PUR-Gießharzbeschichtungen sind selbstglättend.

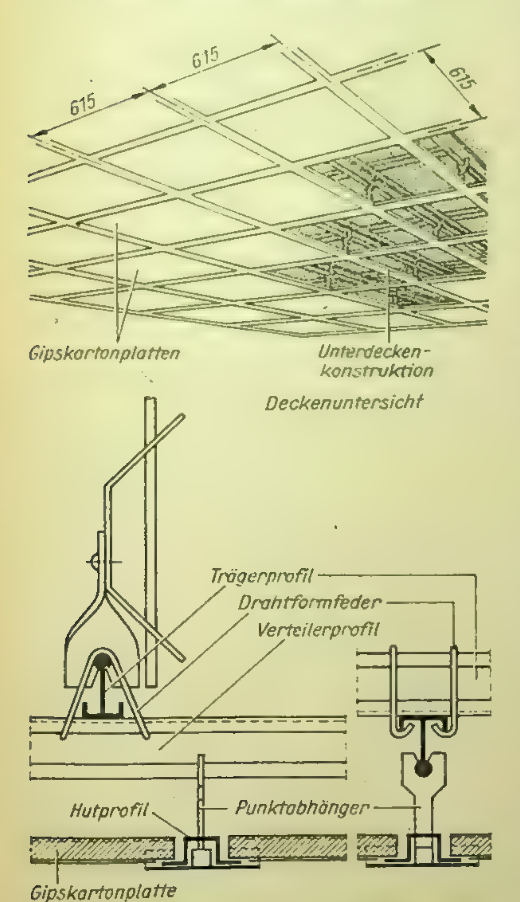


Abb. 15.8.5-1 Unterdecke mit herausnehmbaren Deckenplatten

15.8.5. Unterdecke

Die Hauptfunktion der *Unterdecke* ist die geometrisch-optische Verringerung der Raumhöhe. Nebenfunktionen sind weiter: Raumgestaltung, Schallschutz, Verringerung des Wärmebedarfs, Verhütung der Kondensatbildung, Verkleidung des Installationsbereichs, Aufnahme der Beleuchtungskörper und z. T. auch die Begehbarkeit.

Unterdecken werden mittels Abhängern an der Geschoßdecke befestigt. Die industrielle Entwicklung ist durch die gerüstlose Montage und leicht einstellbare Abhänger gekennzeichnet.

Drahtputzkonstruktionen werden monolithisch hergestellt und bestehen aus an die Geschoßdecke gehängten Rundstahlstangen, an denen ein Drahtnetz befestigt wird. Dieses Drahtnetz dient als Putzträger für den Gips- oder Zementmörtel.

Montageunterdecken bauen sich aus vorgefertigten, abgehängten, quadratischen oder rechteckigen Elementen, 300 bis 1 200 mm groß, auf, deren spezielle Konstruktionen funktionsbedingte Unterschiede aufweisen (Abb. 15.8.5-1).

15.8.6. Treppe

Treppen dienen der Gehverbindung zwischen verschiedenen Geschoßebenen. Die Höhe und Breite der Stufen werden nach den Schrittmaßen des Menschen bemessen. *Treppenpodeste* begrenzen oder unterbrechen den geraden, runden oder gewendelten *Treppenlauf*. Mehrere übereinander angeordnete Geschoßtreppen bilden den *Treppenraum* oder das *Treppenhaus*. Der Freiraum zwischen nebeneinander angeordneten Treppenläufen oder zwischen den inneren Stufenköpfen einer Wendeltreppe wird *Treppenauge* genannt. Die nach dem Treppenauge oder freien Raum offene Treppenseite wird durch Treppengeländer aus Holz oder Stahl, auch mit Füllungen aus anderen Stoffen, oder durch eine massive Brüstung geschlossen (Abb. 15.8.6-1).

In der industriellen Bauproduktion werden vorgefertigte Treppenläufe oder -raumzellen – meist aus Stahlbeton – montiert.

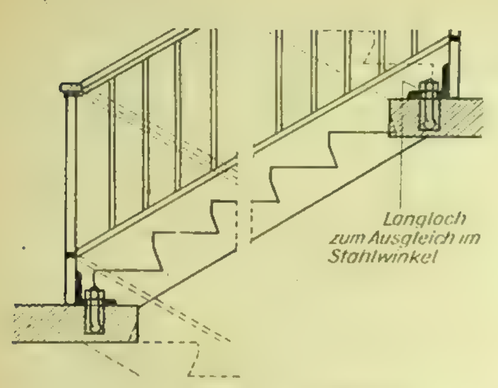


Abb. 15.8.6-1 Montagetreppengeländer

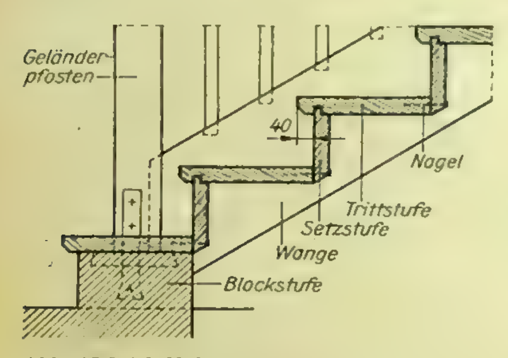


Abb. 15.8.6-2 Holztreppe

Holztreppen. Die Brettstufen, die waagerechte *Trittstufe* und die senkrechte *Setzstufe*, werden zwischen den *Wangen* eingebaut (Abb. 15.8.6-2). In der industriellen Bauproduktion sind Holztreppen von Massivtreppen aus Stahlbeton verdrängt worden.

Massivtreppen. Der Treppenlauf wird von einseitig in Treppenraumwände eingespannten oder beidseitig auf Wände, Betonwangen oder Stahlträger aufgelegten Massivstufen aus Naturstein oder Beton gebildet. Treppenlauflamellen und -platten, gegebenenfalls mit angeformten Podesten, werden als schwere Stahlbeton-Montageelemente vorgefertigt. Als Stufenbelag dienen Kleinkeramik, Plast- und Elastfolien oder Holztrittstufen.

Stahltreppen. Treppenstufen, -wangen und -läufe werden aus Stahlprofilen und -blech gefertigt. Für den Auftritt werden Naturstein-, Betonwerkstein- oder Brettstufen verwendet.

15.8.7. Wandbekleidungen und -beläge

Deckschichten auf Wandflächen erfüllen entsprechend der Raumnutzung besondere Funktionsansprüche, denen die Rohbauwand nicht genügt, wie Ebenheit und Glätte, Abriebfestigkeit, Stoßfestigkeit, Beklebbarkeit, Wasserdichtheit, Raumgestaltung. Sie erfordern wohl zusätzliche Teilprozesse, ersparen aber den Einsatz wertvoller Baustoffe für den gesamten Wandquerschnitt.

In der industriellen Bauproduktion werden Wandplatten aus Stahlbeton oberflächenfertig hergestellt oder Wandbeläge in der Vorfertigung eingeformt, so daß die Baustellenprozesse wegfallen.

Putz. Die rohen Oberflächen von Ziegel- oder Betonwänden werden mit Kalk-, Kalkzement- oder Gipsmörtel geputzt. Die handwerklichen Putzprozesse sind weitgehend rationalisiert worden. Der Putzmörtel wird vom Mischer aus durch Rohr- und Schlauchleitungen unmittelbar an den Arbeitsplatz gepumpt und ohne Innengerüst aus einer Düse an die Wand- und Deckenfläche geworfen, mit Langstielgeräten („Kartätschen") vom Fußboden aus abgezogen und mit dem Reibebrett – an den oberen Wandbereichen und an der Decke von einer kleinen fahrbaren Arbeitsbühne aus – geglättet.

Trockenputz. Unter „*Trockenputz*" werden großformatige Tafeln verstanden, z. B. Gipskarton-, Fasertafeln, die meist mit Gipsklebern an der rohen Wandfläche befestigt werden. Dem technologischen Vorteil – Wegfall der Feucht- und Schmutzprozesse – steht der ökonomische Nachteil – höherer Gesamtaufwand gegenüber Putzmörtelverwendung – entgegen, so daß der Trockenputz sich nicht durchsetzen konnte und seine Anwendung auf den Gesellschaftsbau und die Rekonstruktion beschränkt bleibt.

Fliesenbelag. *Keramische Fliesen* haben für Innen- und Außenwandflächen vorteilhafte Gebrauchseigenschaften, sind billig, werden aber handwerklich einzeln im Mörtel- und Klebebett verlegt. Teilindustrielle Fortschritte werden durch Vorfertigung und Montage von Fliesentafeln ($\approx 1\ m^2$ groß) und durch Anformen an Wandplatten im Betonwerk erreicht (Abb. 15.8.7-1).

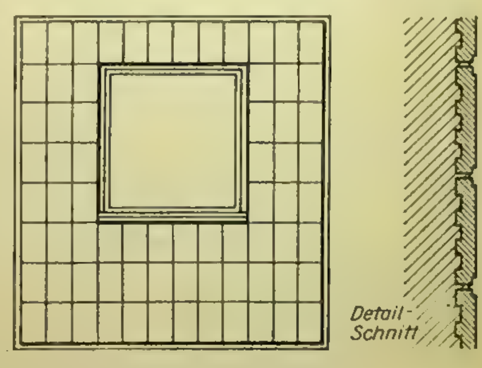


Abb. 15.8.7-1 Außenwandelement mit Keramikverkleidung

15.8.8. Oberflächen

Die Oberflächenbehandlung erfüllt gleiche oder ähnliche Funktionen wie die Deckschichten (vgl. 15.8.7.), die aufgebrachten Schichten sind jedoch wesentlich dünner. Wegen des großen Umfangs der Oberflächenbehandlung und ihrer intervallmäßig notwendigen Erneuerung sind rationelle und intensive Fertigungsverfahren wichtig. Die stationäre Oberflächenbehandlung ist technisch und ökonomisch vorteilhaft, deshalb wird angestrebt, alle Bauelemente oberflächenfertig herzustellen. Sie dürfen dann beim Transport und Einbau nicht mehr beschädigt werden. Die Oberflächenbehandlung fällt weg, wenn die Stoffstruktur den Anforderungen entspricht, z. B. bei Sichtbeton, bei nichtrostendem Stahl und bei Plasten.

Arten der Oberflächenbehandlung sind *Bekleben* oder *Bespannen* mit Tapete und Folie, „*Anstriche*" mit verschiedenen Verfahren, wie Streichen, Rollen, Spritzen, Tauchen, Gießen, elektrostatischem Beschichten, *Vergüten* durch Eloxur, Glasur, Kaschur, Versiegeln, *mechanische* oder *chemische Behandlung* der Oberfläche, bei Beton z. B. durch Sandstrahlen, Scharrieren, Säuern.

15.8.9. Einbauelemente

Einbauelemente sind gewöhnlich Zulieferteile anderer Industriezweige für die Komplettierung des Gebäudes. Sie werden als Standarderzeugnisse serienmäßig und industriell produziert. Sie sollen oberflächenfertig sein und ohne Anpaß- und Nacharbeiten montiert werden.

Fenster. Hauptfunktionen der Fenster sind Belichtung und Belüftung. Fenster bestehen aus dem in der Wandöffnung befestigten Fensterrahmen, in den mittels Beschlägen die verglasten Fensterflügel eingehängt werden. Nach Befestigungspunkt und Bewegungsrichtung der Flügel werden *Dreh-*, *Wende-*, *Schwing-*, *Kipp-* und *Klappflügelfenster* unterschieden. Um die Wärmeverluste zu senken, werden beim *Doppelfenster* 2 Flügel hintereinander angeordnet, beim *Kastenfenster* sind sie durch das Futter des Kastenrahmens getrennt und beim *Verbundfenster* miteinander verschraubt (Abb. 15.8.9-1). Der gleiche Zweck wird durch einfache Flügel mit Doppel- oder Dreifachverglasung, sog. *Thermoscheiben* (vgl. 6.3.4.), erreicht.

Neben dem nach wie vor gebräuchlichsten Werkstoff Holz werden die Fensterrahmen aus Stahl, Aluminium und Beton hergestellt.

Türen. Hauptfunktion der Türen ist der Raum- und Gebäudezugang, Nebenfunktionen sind Belüftung und Belichtung. Türen bestehen aus dem in der Wandöffnung befestigten *Türrahmen*, in den mittels Beschlägen die *Türflügel* eingehängt werden. Der Türrahmen, meist aus Holz, ist als *Blendrahmen*, als *Futter mit Bekleidung*, als

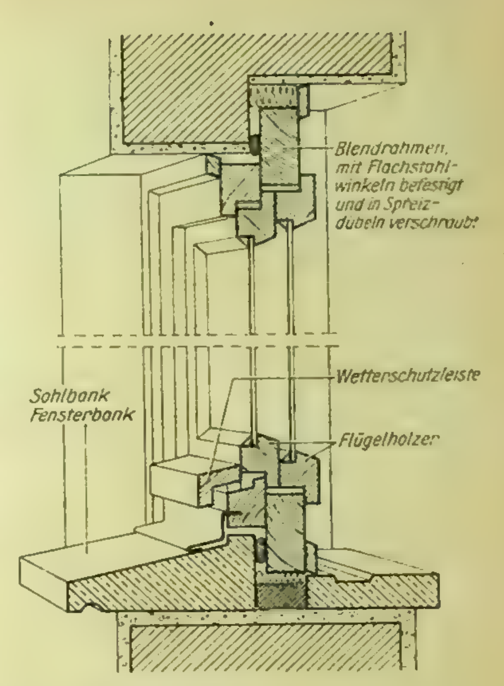


Abb. 15.8.9-1 Schnitt durch ein Verbundfenster

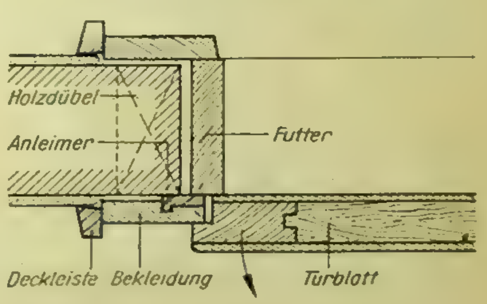


Abb. 15.8.9-2 Schloßseite einer Futtertür (Querschnitt)

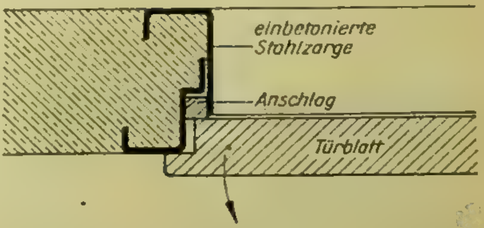


Abb. 15.8.9-3 Stahlzargentür (Oberseite im Längsschnitt)

Zarge (in neuerer Zeit nur noch aus Stahl), als *Gewände* aus Natur- und Betonwerkstein ausgebildet. In der industriellen Vorfertigung von

Betonwandplatten werden Gewände in diese unmittelbar eingeformt (Abb. 15.8.9-2 bis 15.8.9-4).
Die Türflügel werden unabhängig vom Türrahmen aus Holz als handwerkliche Rahmen- und Füllungstür oder aufgedoppelte Tür mit zusätzlichem Brettbelag, aus Holzwerkstoffen als Sperrholz-, Spanplatten- oder folienbeschichtete Tür, aus Stahl, z. B., als Feuerschutztür, aus Aluminium oder aus Glas (ohne Flügelrahmen) hergestellt. Türflügel können teilweise oder ganz verglast sein. Doppeltüren dienen vor allem dem Schallschutz.

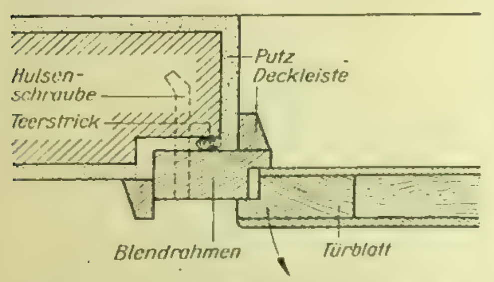


Abb. 15.8.9-4 Schloßseite einer Blendrahmentür (Querschnitt)

Verglasungen. Wand-, Dach- und Deckenflächen werden mit Glas- oder Plastelementen durchsichtig oder lichtdurchlässig geschlossen. Volle oder hohle Glasbausteine werden wie Ziegel vermauert. Hölzerne oder stählerne Sprossenkonstruktionen werden mit Glasscheiben verkittet oder kittlos verglast, gegebenenfalls aus Sicherheits- oder Drahtglas. Profilglas mit U-Querschnitt wird einfach oder doppelt mit offener oder mit PVC-Profilen gedichteter Fuge als Streifenelement verwendet, d. h. die Hauptabmessung entspricht der Höhe der Öffnung. Für Dachverglasungen werden außerdem GUP-Welltafeln eingesetzt.

15.9. Technische Gebäudeausrüstung

Die technische Gebäudeausrüstung (kurz *TGA*, früher auch *Haustechnik* genannt) umfaßt die zur funktionellen Grundnutzung von Gebäuden erforderliche anlagentechnische Ausstattung, einschließlich aller Übertragungseinrichtungen für die Ver- und Entsorgung. Sie schafft die Voraussetzungen für das Erreichen von Sicherheit, Sauberkeit und Behaglichkeit. Der hierfür erforderliche Aufwand stellt einen bedeutenden Anteil an den Gesamtkosten eines Bauwerks dar. Mit der wachsenden Typisierung im Wohnungs- und Industriebau wird die Installation der TGA immer seltener gesonderten Bedarfsfällen angepaßt und statt dessen industriell vorgefertigt und zum Bestandteil der Bauausführung.

15.9.1. Heizungsanlagen

Heizungsanlagen werden nach dem Wärmebedarf eines Raums oder eines Gebäudes ausgewählt und dimensioniert. Der Wärmebedarf wird bestimmt durch die klimatischen Bedingungen, die Gebäudebauart, die Bauart von Fenstern und Türen u. a.
Einzelheizung bedeutet Wärmeerzeugung und -nutzung am gleichen Ort.
Ortsfeste Kachelöfen (Abb. 15.9.1-1) sind Wärmespeicheröfen aus Schamottesteinen und Kacheln. Die Wärmeabgabe erfolgt langsam und ist nicht regelbar (Wirkungsgrad η = 80%). Kachelöfen gibt es in leichter, mittlerer und schwerer Bauart; die spezifische Heizleistung beträgt abhängig von der Ausführung 1200, 950 bzw. 700 J/m^2 · s. *Transportable Kachelöfen* werden nur in leichter Bauart hergestellt.
Eiserne Einsatzöfen mit Kachelummantelung und Warmluftschächten (Kachelofen-Luftheizung) gestatten eine gewisse Regelung der Heizleistung. *Eiserne Öfen* sind entweder *Durchbrandöfen*, bei denen der ganze Brennstoff schnell in Glut gerät, oder *Unterbrandöfen* (*Dauerbrandöfen*), bei denen die Glutschicht etwa konstant hoch bleibt. Unterbrandöfen haben gegenüber ortsfesten Kachelöfen die drei- bis vierfache spezifische Heizleistung, dagegen nur 10% der Masse.
Gasheizöfen werden in *Innenwand-* und *Außenwandraumheizer* unterschieden. Sie sind über die Gaszufuhr regelbar (auch automatisch), haben eine Zünd- bzw. Gasmangelsicherung und sind leicht zu bedienen. Die Wärme wird durch Strahlung und Konvektion abgegeben. Die Abgase werden entweder durch einen Abgasschornstein oder bei Außenwandraumheizern durch Öffnungen in der Außenwand abgeführt (η = 80 bis 85%, Abb. 15.9.1-2).
Elektrische Heizung ist eine saubere, bequeme, aber teure Heizart. *Heizsonnen* mit Leistungen von 0,5 bis 1,0 kW haben reine Strahlungswir-

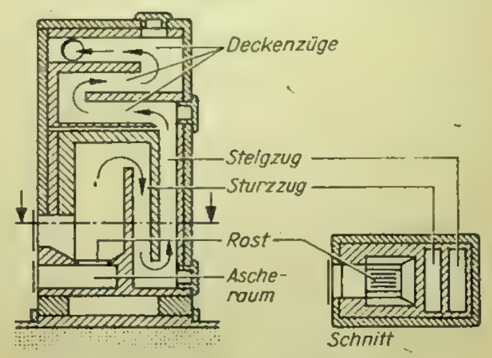


Abb. 15.9.1-1 Ortsfester Kachelofen

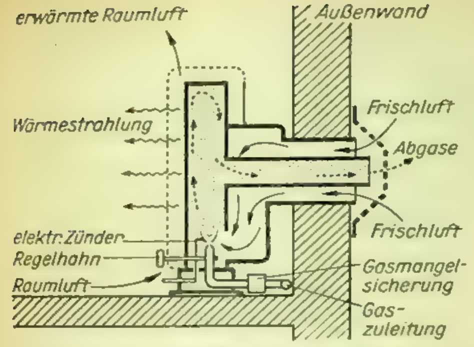


Abb. 15.9.1-2 Außenwand-Gasraumheizer

kung ebenso wie *Strahlungsöfen* mit 2 oder 3 Schaltstufen und 1,0 bis 4,0 kW Leistung. Hochtemperaturstrahlungsheizkörper. *Infrarotstrahler*, strahlen die Wärme vorwiegend im IR-Bereich (0,75 bis 1,0 μm) ab. *Speicheröfen* haben einen keramischen Kern, mit dem sie die mit billigem Nachtstrom erzeugte Wärme speichern und am Tag durch Strahlung und Konvektion abgeben. Mit Hilfe eines eingebauten Gebläses kann die Wärmeabgabe verstärkt und zeitlich besser geregelt werden. In wassergefüllten *Porzellanradiatoren* wird das Wasser durch einen elektrischen Heizstab, die *Heizpatrone*, erwärmt. Sie sind als ortsbewegliche Zusatzheizungen gebräuchlich. *Heizlüfter* sind leichte Heizgeräte mit elektrischen Heizspiralen und einem Lüfter, die die Raumluft umwälzen und erwärmen.

Ölöfen. Hauptbestandteile des Ölofens sind der Verdampfungsbrenner, Brennraum und Vorratsbehälter. Der Energieträger ist leicht siedendes Heizöl. η = 70 bis 75%.

Sammelheizung. Eine Sammelheizungsanlage besteht aus dem Heizkessel zur Wärmeerzeugung oder dem Wärmeübertrager zur Wärmeumformung bei Fernheizungsanschluß, dem Rohrleitungsnetz für den Wärmetransport, Heizflächen zur Warmeabgabe, Ausdehnungsgefäßen, Umwälzpumpen oder Umlaufbeschleuniger sowie Sicherheits- und Regeleinrichtungen.

Warmwasserheizungen nutzen Wasser als Wärmeträger, das erwärmt und umgewälzt wird. Sie sind einfach regelbar und lassen sich unterschiedlichen Anforderungen gut anpassen. Die Oberflächentemperatur der Heizelemente ist relativ niedrig. Bei der *Schwerkraft-Wasserheizung* bewirkt der Unterschied zwischen der Dichte des heißen Wassers im Heizkessel (ϱ = 0,965 g/cm^3 bei 90°C) und des etwas abgekühlten Wassers in den Heizkörpern (ϱ = 0,978 g/cm^3 bei 70°C) die Umwälzung. Liegen zwischen Heizkessel und äußerstem Heizkörper über 50 m, so muß der Wasserumlauf durch eine Pumpe unterstützt werden (*Pumpen-Warmwasserheizung*). Bei der *Stockwerks-* oder *Etagenheizung* befinden sich Heizkessel, Rohrleitungen und Heizkörper etwa auf gleicher Höhe. Wegen des geringen Höhenunterschieds benötigen sie größere Rohrdurchmesser, um einen genügenden Wärmetransport zu erreichen (Schwerkraftbetrieb; Abb. 15.9.1-3). Stockwerksheizungen mit Pumpenbetrieb arbeiten mit Rohrdurchmessern von 15 mm, die die Raumansicht wenig beeinträchtigen.

Dampfheizung. In Hochdruck- und auch Niederdruckanlagen kondensiert Dampf bei 100°C und füllt die Heizkörper (Abb. 15.9.1-4). Die gleichbleibende Temperatur des Heizmediums bewirkt auch eine stets gleiche Wärmeleistung der Heizkörper. Wechselnder Wärmebedarf kann nur durch intervallförmige Heizung gedeckt werden.

Luftheizungen sind Anlagen, bei denen als Wärmeträger Luft verwendet wird. Bei *Feuerluftheizungen* wird die Luft unmittelbar an den Heizflächen einer Feuerstelle, z. B. in einem Kachelofen, erwärmt. Eingesetzt wird sie für Zwei- oder Dreizimmerheizung auf gleicher Etage bzw. bei übereinanderliegenden Räumen. Die Umwälzung der Warmluft erfolgt durch Schwerkraftwirkung oder bei großen horizontalen Ausdehnungen, z. B. Betriebsräumen, Werkstätten,

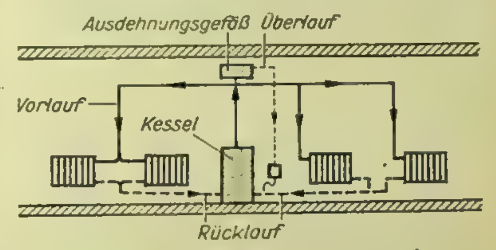


Abb. 15.9.1-3 Schwerkraft-Stockwerksheizung mit Rücklauf über dem Fußboden

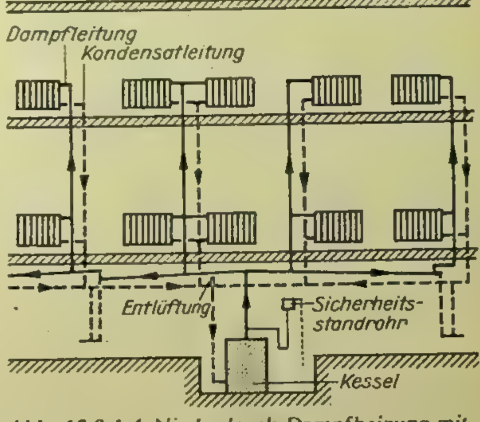


Abb. 15.9.1-4 Niederdruck-Dampfheizung mit unterer Verteilung und trockener Kondensatleitung

durch Ventilatoren. Bei *Dampf-* und *Wasserluftheizungen* wird als Zwischenwärmeträger Dampf, Warm- oder Heißwasser verwendet. Die Wärmeübergabe an die Luft und deren Transport in die zu beheizenden Räume geschieht durch an beliebiger Stelle der Decke oder Wand angeordnete Luftheizgeräte mit eingebautem Ventilator. Die Beheizung mehrerer Räume kann auch über eine *Heizzentrale*, in der die Luft erwärmt wird, und ein *Kanalnetz* zur Verteilung der erwärmten Luft erfolgen.

Strahlungsheizungen geben die Wärme vorwiegend durch Strahlung an den Raum ab. Entsprechend der Ausführungsform unterscheidet man verschiedene Heizungsarten. Bei *Flächenstrahlungsheizungen* sind die vom Warmwasser durchflossenen Rohrschlangen in Decken, Wänden oder Fußböden verlegt. *Plattenstrahlungsheizungen* benutzen Dampf oder Heißwasser als Wärmeträger, und die Rohrschlangen sind auf Blechplatten montiert. *Infrarotstrahlungsheizungen* strahlen die Wärme über stromdurchflossene Widerstandsdrähte oder gasbeheizte Strahler ab.

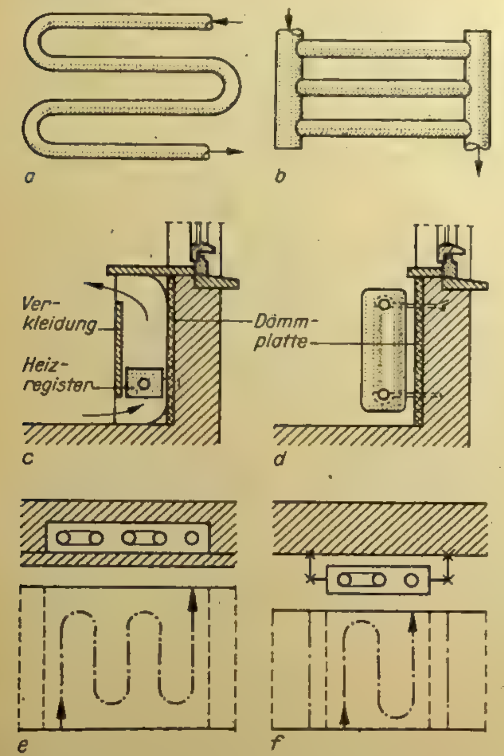


Abb. 15.9.1-5 Heizflächen: a Rohrschlange und b Rohrregister, c Konvektor, d Radiator, e Deckenheizfläche (Strahlungsheizung), f Strahlplatte

Bei der *Sonnenheizung* wird die Sonnenenergie von einem Parabolspiegel gebündelt und auf einen im Brennpunkt montierten Wärmeaustauscher gerichtet. Bei einer anderen Bauart wird das Hausdach mit geschwärzten Metallplatten bedeckt und die absorbierte Wärmeenergie an einen zirkulierenden Wärmeträger, meist Wasser, übertragen. Eine Zusatzheizung in Abhängigkeit von der Intensität der Sonneneinstrahlung ist erforderlich.

Heizflächen (Abb. 15.9.1-5) dienen der Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion. Sie werden nach der äußeren Form und dem Aufbau untergliedert. *Rohrheizkörper* bestehen aus Stahlrohr, die als *Rohrschlangen* oder *-register* gestaltet werden. Zur Erhöhung der wärmeabgebenden Oberfläche werden Blechlamellen (Rippenrohre) oder -streifen in wendelförmiger Anordnung auf das Rohr aufgebracht. *Konvektoren* sind Rippenrohre mit Schachtverkleidung. *Sockelheizkörper* sind eine Konvektorbauart mit geringer Höhe, die meist raumumlaufend angeordnet sind. *Radiatoren* sind variabel zusammensetzbare Gliederheizkörper aus Stahl, Grauguß, Keramik oder in Form von *Flachheizkörpern* aus Stahlblech. Die Heizflächen für Strahlungsheizungen sind in die Baukonstruktion als Wand-, Decken- oder Fußbodenheizung eingebaut oder als besonders angeordnete *Strahlplatten* montiert (Rohrschlangen mit Stahlblechabdeckung). Für Luftheizungen werden *Wand-* oder *Deckenluftheizer* eingesetzt.

15.9.2. Lüftungs- und Klimaanlagen

Die Anlagen der *Lüftungs-* und *Klimatechnik* sollen die für einen Raum infolge seines Verwendungszwecks definierten Luftzustände herstellen bzw. aufrechterhalten. Mit den Lüftungsanlagen wird die verbrauchte Raumluft abgeführt und dem Raum Frischluft zugeführt, wobei meist eine Luftaufbereitung, z. B. Filtern, Erwärmen, Kühlen, erforderlich ist. Die Lüftungsanlagen werden nach der Energieform, die zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der Luftströmung im Raum erforderlich ist, unterschieden in freie Lüftung und erzwungene Lüftung.

Freie Lüftung nutzt die Wind- und die thermische Auftriebsenergie, wobei eine Luftaufbereitung kaum möglich ist. Zur freien Lüftung gehören die *Fugenlüftung* durch bauliche Undichtheiten von Fenstern, Türen und Porosität der Baustoffe, die *Fensterlüftung*, die *Schachtlüftung* durch Luftschächte aufgrund thermischer Druckdifferenzen (Abb. 15.9.2-1) und die *Dachaufsatzlüftung*.

Erzwungene Lüftung erreicht die Luftströmung im Raum durch den Einsatz elektroenergiebetriebener Lüfter. Mit der *Sauglüftung* wird die verbrauchte Raumluft abgesaugt, wodurch im Raum ein geringer Unterdruck entsteht, der das unkontrollierte Nachströmen von Frischluft oder

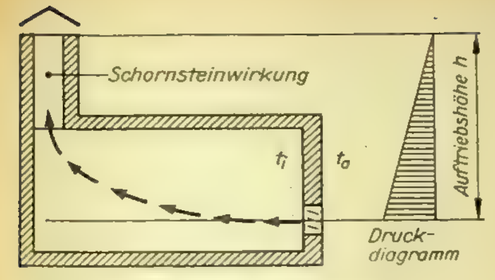


Abb. 15.9.2-1 Schema der Schachtlüftung ($t_i > t_a$)

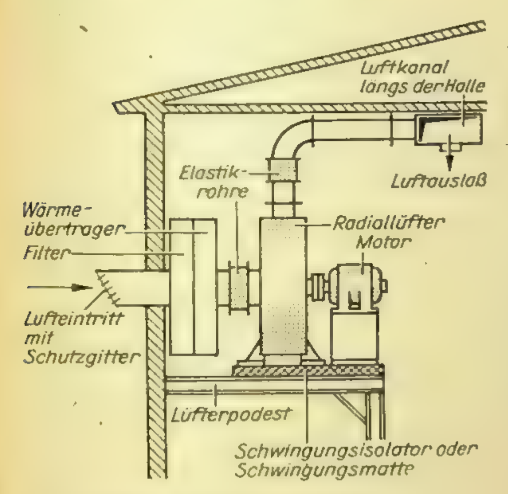


Abb. 15.9.2-2 Drucklüftungsanlage

verbrauchter Raumluft aus angrenzenden Räumen bewirkt. Die entstehende Belastung des Raums mit Zugluft, Dämpfen, Stäuben oder Gasen sowie die weitgehende Einschränkung einer gezielten Luftaufbereitung sind nachteilig. Durch den Einsatz der *Drucklüftung* (Abb. 15.9.2-2) kann die dem Raum zugeführte Luft gezielt aufbereitet werden, das Abströmen der verbrauchten Raumluft in angrenzende Nebenräume ist aber meist nicht zu verhindern. Beste Lösung ist die *Verbundlüftung*, bei der eine kontrollierte Strömung der Luft im Raum und deren Aufbereitung entsprechend der geforderten Parameter, wie Temperatur, Feuchtigkeit, Staubfreiheit, gut durchgeführt werden kann.

Zur Beseitigung örtlicher Luftverunreinigungen werden *örtliche Absaugungen* bzw. zum Zuführen von Frischluft *Luftduschen* eingesetzt. *Luftschleieranlagen* vermeiden das Einströmen von Kaltluft an langzeitig geöffneten Toren.

Die Hauptbestandteile einer Lüftungsanlage sind Lüfteraggregat, Kanalnetz, Luftdurchlässe, Aggregate zur Luftaufbereitung sowie Regel- und Sicherheitseinrichtungen.

Lüfteraggregate werden als Radial- oder Axiallüfter ausgeführt. *Radiallüfter* erfordern meist eine besondere Aufstellung in einem Lüfterraum oder auf einem Lüfterpodest, während *Axiallüfter* in Rohrleitungen, Wand- oder Dachdurchbrüchen und in Fensterflächen ohne großen Bauaufwand eingesetzt werden können. Die Luftführung erfolgt in Kanälen oder Rohren aus Stahlblech, Plast, Asbestzement bzw. Mauerwerk oder Beton. *Luftdurchlässe* sind Lufteintritts- und Luftaustrittsöffnungen mit festem Gitter oder verstellbaren Jalousien. *Luftaufbereitungsaggregate* können Filter, Wärmeübertrager, Kühler, Be- bzw. Entfeuchtungsgeräte sein. *Regeleinrichtungen* ermöglichen die genaue Festlegung der Mengenströme bzw. der Parameter der Luftaufbereitung. *Sicherheitseinrichtungen* als Feuerschutzklappen ausgebildet verhindern das Ausdehnen von Bränden durch das Lüftungssystem auf benachbarte Räume bzw. das Zuführen von Verbrennungsluft.

Bei *Frischluftbetrieb* wird dem Raum von außen angesaugte, aufbereitete Frischluft zugeführt. Bei *Umluftbetrieb* wird die Raumluft angesaugt, aufbereitet und dem Raum wieder zugeführt. *Mischluftbetrieb* ist eine Kombination beider Arten. Betriebsgeräusche der Lüftungsanlagen werden durch Lärmschutzkabinen, Rohrschalldämpfer und entsprechende konstruktive Gestaltung der Luftauslaßöffnungen gemindert.

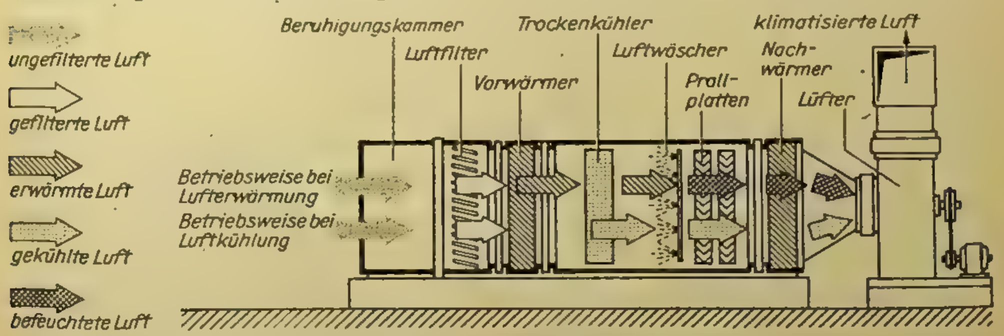


Abb. 15.9.2-3 Aufbau und Betriebsweise einer Klimaanlage

Klimaanlagen nehmen eine komplexe Behandlung der Raumluft vor. Durch Beeinflussung der Klimafaktoren kann die Luft bedarfsgerecht aufbereitet, d. h. erwärmt, gekühlt, be- oder entfeuchtet, von Stäuben oder im Sonderfall von dampf- und gasförmigen Verunreinigungen befreit bzw. entkeimt werden. Die Aufbereitung wird automatisch geregelt, so daß erforderliche Luftzustände unabhängig von der Umgebungsluft langzeitig geschaffen und stabil gehalten werden können. Aufbau und Betriebsweise einer Klimaanlage (Abb. 15.9.2-3) gleichen grundsätzlich denen einer Lüftungsanlage mit entsprechend vielseitiger Luftbehandlung. Neben *Zentralklimaanlagen*, z. B. in Theatern, bestimmten Produktionsräumen, Hotels, und *Einzelklimaanlagen*, sog. *Klimatruhen* für kleine Räume, gibt es Kombinationen beider Anlagenarten. Der Anlagenaufbau wird von Art und Umfang der Luftbehandlung bestimmt.

15.9.3. Wasserversorgungsanlagen

Kaltwasserversorgungsanlagen werden unterteilt in Eigen- und Sammelversorgungsanlagen. Die *Eigenversorgungsanlagen* bestehen aus *Brunnen* zur Wassergewinnung, *Pumpen* zur Förderung des Wassers und *Druckbehälter* zur Wasserspeicherung. Bei *Sammelversorgungsanlagen* wird die Wassergewinnung durch ein oder mehrere *Wasserwerke* durchgeführt und einem Versorgungsnetz zugeführt. Die *Gebäudeanschlußanlage* verbindet die Rohrleitungen des Versorgungsnetzes mit der Installation im Gebäudeinnern und endet bei Eigenversorgungsanlagen am Druckbehälterabfluß, bei Sammelversorgungsanlagen nach dem Wasserzähler. Sie wird frostfrei und mit Gefälle verlegt. An die Gebäudeanschlußanlage schließt sich die *Verbraucheranlage* mit *Verteilungs-*, und einzeln absperrbaren *Steig-* und *Zweigleitungen* zu den Verbrauchern an (Abb. 15.9.3-1). Die Rohrleitungen bestehen aus Stahl, Gußeisen, Plast oder Asbestzement.

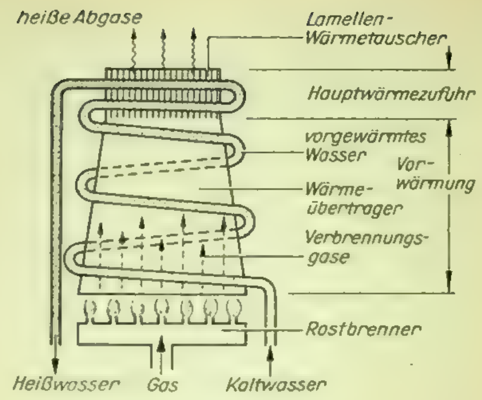


Abb. 15.9.3-2 Gasdurchlauferhitzer

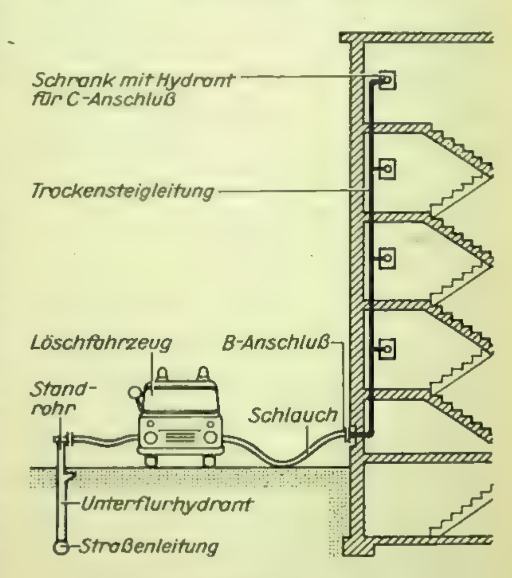


Abb. 15.9.3-3 Trockene Feuerlösch-Steigleitung mit Hausanschluß für B-Rohr (70 mm Durchmesser) und Geschoßanschlüssen für C-Rohr (52 mm)

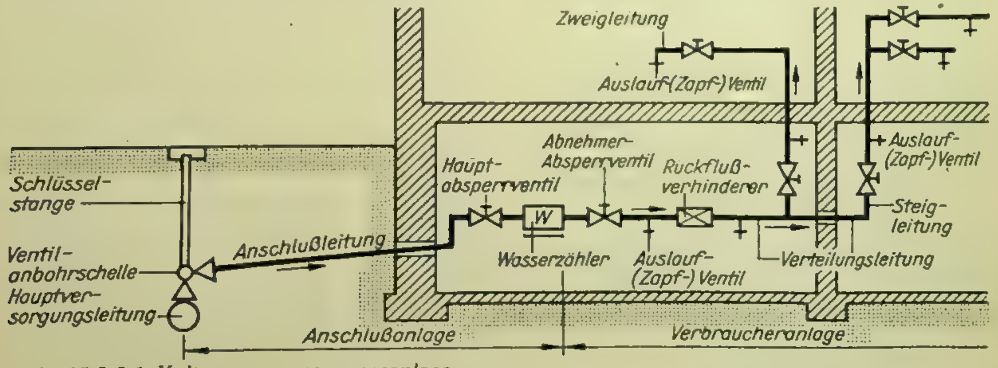


Abb. 15.9.3-1 Kaltwasserversorgungsanlage

Warmwasserversorgungsanlagen unterteilt man nach der Warmwasserbereitung in örtliche und zentrale Anlagen, die entweder nach dem Speicher- oder Durchlaufprinzip arbeiten. Zu den *örtlichen Warmwasserversorgungsanlagen*, die vorzugsweise im Wohnungsbau oder für kleine Anlagen mit wenig Zapfstellen angewendet werden, gehören *Kohlebadeöfen*, *Elektroboiler* (Speicherprinzip) und *Gas-* bzw. *Elektrodurchlauferhitzer* (Durchlaufprinzip, Abb. 15.9.3-2). Anlagen zur Warmwasserversorgung nach dem *Speicherprinzip* für eine Zapfstelle arbeiten meist drucklos, für die Versorgung mehrerer Zapfstellen dagegen ist eine druckfeste Ausführung erforderlich. Warmwasserversorgungsanlagen, die nach dem *Durchlaufprinzip* arbeiten, stehen unter Wasserleitungsdruck. Dieser Druck wölbt beim Öffnen des Zapfventils eine Membran, die das Ventil für das Heizmedium öffnet. Das zufließende Kaltwasser wird im Vor- und Hauptwärmeübertrager erwärmt. *Zentrale Warmwasseranlagen* versorgen mehrere Zapfstellen, wobei das Wasser mittels Heizrohrschlangen und -registern in Hochdruckspeichern (Boiler) erwärmt wird. Die Erwärmung des Wassers wird meist auf 60°C begrenzt, um das Absetzen von Kesselstein zu vermeiden. Bei Warmwassernutzung in industriellen Anlagen ist die zentrale Warmwasserbereitung meist mit der Heizungsanlage verbunden.

Feuerlöschanlagen sind in öffentlichen Gebäuden, wie Warenhäusern, Industriegebäuden usw., und in Wohnhäusern mit mehr als 5 Stockwerken vorgeschrieben. Eingesetzt werden ortsbewegliche *Feuerlöschgeräte*, z. B. Handfeuerlöscher für unterschiedliche Brandursachen, und Trocken- und Naßsteigleitungen.

Trockensteigleitungen werden erst nach Anschluß eines Löschfahrzeugs wasserführend (Abb. 15.9.3-3), während *Naßsteigleitungen* direkt an das Kaltwasserversorgungsnetz angeschlossen sind, dadurch ständig mit Wasser gefüllt und betriebsbereit sind. Die Steigleitungen müssen frostfrei verlegt werden. In allen Geschossen sind an die Steigleitungen Zapfstellen (Wandhydranten) mit Schlauchanschluß zu installieren, wobei die Schlauchrolle direkt neben der Zapfstelle angeordnet oder die von der Feuerschutzpolizei mitgeführte Schlauchrolle angeschlossen wird. In Hochhäusern wird neben der Naßsteigleitung eine Trockensteigleitung installiert, die nicht mit der Kaltwasserversorgung des Hauses verbunden ist, sondern durch Zwischenschalten einer Pumpe mit dem Straßenhydranten wasserführend wird.

Sprühdüsensysteme werden von Hand oder automatisch durch Metallschmelzeinsätze ausgelöst.

Löschbrausen installiert man meist an den Ausgängen. *Regenwände* sind in einer Reihe angeordnete Löschbrausen und trennen Brandabschnitte voneinander. *Sprinkleranlagen* sind netzförmig angeordnete Düsensysteme, mit denen im Brandfall eine flächenartige Beregnung durchgeführt wird.

15.9.4. Entwässerungsanlagen

Die *Grundstückentwässerung* muß die ordnungsgemäße Abführung aller anfallenden Abwässer gewährleisten. Dazu gehören häusliche Abwässer aus Küche und Bad, Fäkalien, Regen- und industrielle Abwässer. Die Anlagen bestehen aus *Entwässerungsgegenständen*, z. B. Waschbekken, die mittels *Anschlußleitungen* und mit Gefälle an senkrecht verlegte *Falleitungen* angeschlossen werden. Die ebenfalls mit Gefälle im Erdreich verlegten *Grundleitungen* führen das Abwasser zum *Straßenkanal* (Abb. 15.9.4-1).

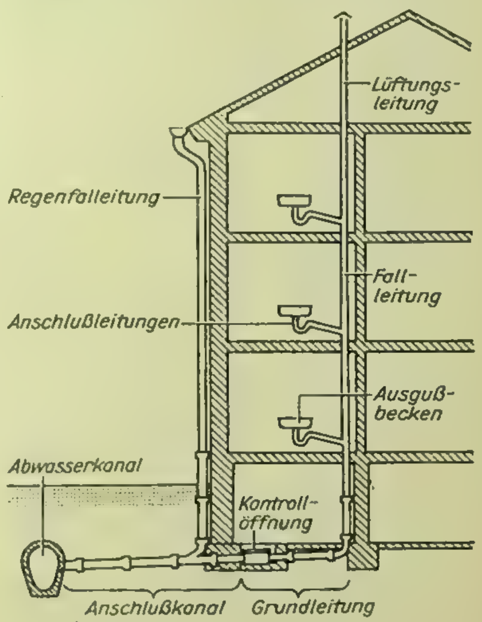


Abb. 15.9.4-1 Leitungsabschnitte der Gebäudeentwässerung

Zusätzlich erforderliche Einbauten sind *Prüfschächte* zur Reinigung der Rohrleitungen und über Dach führende *Lüftungsleitungen* zum Druckausgleich, die das Leersaugen der Geruchsverschlüsse vermeiden. Zum Abführen des Regenwassers ist eine gesonderte, an die Grundleitung angeschlossene *Regenfalleitung* vorzusehen.

Sanitäre Einrichtungsgegenstände sind zugleich Entwässerungsgegenstände, die durch einen *Geruchsverschluß* mit der Anschlußleitung verbunden sind. Durch den Geruchsverschluß und die Lüftungsleitung wird das Austreten von Kanalgerüchen vermieden.

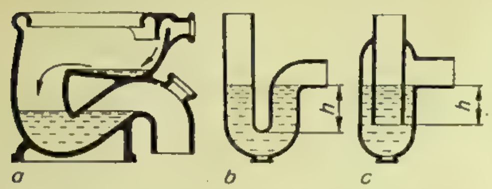


Abb. 15.9.4-2 a Abortbecken mit Geruchverschluß, b S-Geruchverschluß und c Flaschengeruchverschluß. h = Mindestwasserstand

Er ist entweder Bestandteil des Entwässerungsgegenstands (Abb. 15.9.4-2a) oder zusätzliches Einbauteil (Abb. 15.9.4-2b,c). Zu den Entwässerungsgegenständen gehören Handwaschbekken, Waschtische, Spül- und Ausgußbecken, Sitzwaschbecken, Badewannen, Brausetassen, Abort- und Urinalbecken. Sie werden vorwiegend aus Keramik oder Plast hergestellt.

15.9.5. Gasversorgungsanlagen

Die Gaszufuhr zur Gebäudegasanlage beginnt nach der Hauptabsperreinrichtung der öffentlichen Gasversorgung und verläuft über Verteilungs-, Steig-, Zähleranschluß- und Verbrauchsleitung zu der Gasanwendungsanlage. Die Verbrennungsprodukte werden von der Abgasanlage ins Freie geführt.

In *Gasanwendungsanlagen* erfolgt die Umwandlung der Energie in Wärme oder Licht. Sie werden unterteilt in *Gasgeräte*, bei denen die Abgase unter Einhaltung lufthygienischer Forderungen in den Aufstellungsraum einströmen dürfen (Gaskocher, -herde, -backöfen) und *Gasfeuerstätten*, bei denen die Abgase durch eine Abgasanlage abgeführt werden müssen (Gasraumheizer, -badeöfen, -lufterhitzer). Die Gasanwendungsanlagen müssen durch einen festen Rohranschluß mit der Verbrauchsleitung verbunden sein (Ausnahme bei Gasgeräten mit einem Nennverbrauch $< 2{,}5\ m^3/h$ ist möglich). Bei Gasfeuerstätten sind besonders die Forderungen

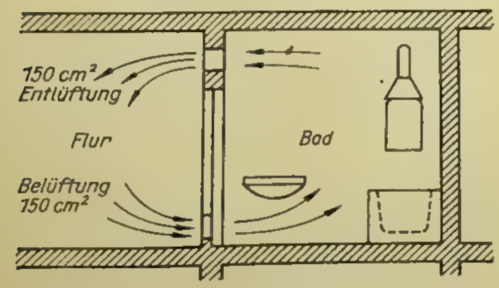


Abb. 15.9.5-1 Be- und Entlüftung von Sanitärräumen (natürliche Luftbewegung)

an Raumgröße, -lüftung und Abgasanlage zu beachten (Abb. 15.9.5-1). Die nach der Energieumwandlung in Gasanwendungsanlagen anfallenden Abgase enthalten gesundheitsschädigende Bestandteile, die aus dem Raum abgeführt werden müssen. Sie erfordern deshalb bei hohem Gasverbrauch eine abnahme- und genehmigungspflichtige *Abgasanlage*. Diese besteht aus der *Abgasleitung* und dem *Abgasschornstein*, wobei beide Bestandteile richtig dimensioniert sein müssen (Gewährleistung des thermischen Auftriebs, strömungstechnische Ausbildung). Um das unkontrollierte Ausströmen von unverbrauchtem Gas zu verhindern bzw. einen gefahrlosen Betrieb zu ermöglichen, sind *Sicherheitseinrichtungen*, wie *Zündsicherung*, *Zugunterbrecher*, *Rückstromunterbrecher* (Abb. 15.9.5-2) und *Meidinger Scheibe* (waagerechte Platte über der Schornsteinmündung) erforderlich. Wird bei kurzzeitigen Druckveränderungen im Abgasschornstein der Zug zu groß (Teilbild *a*) und droht dadurch die Gasflamme zu verlöschen, so wird zusätzlich Nebenluft aus dem Raum abgesaugt und damit die Zugbelastung der Flamme verringert. Entsteht ein Stau (*b*) oder eine Rückströmung (*c*) infolge Windeinflusses, treten die Abgase kurzzeitig in den Raum aus und verhindern das Verlöschen der Flamme.

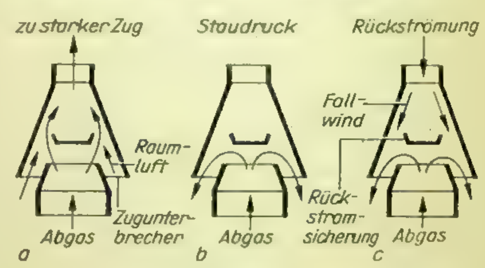


Abb. 15.9.5-2 Strömungssicherung am Abgasrohr

15.9.6. Elektrizitätsversorgungsanlagen

Die Versorgung der Gebäude mit Elektroenergie erfolgt vorwiegend mit *Niederspannung* (220 V bzw. 380 V); für Steuer-, Signal- und Nachrichtenanlagen wird auf *Kleinspannung* (110 V bzw. 42 V) reduziert. Die erforderlichen *Installationselemente* sind Leitungen aus Kupfer oder Aluminium, deren Isolation aus Plast, Gummi, Porzellan, Lack u. ä. besteht, und *Zubehör* (vgl. 11.3.1.).

Die elektrische Anlage des Gebäudes (Abb. 15.9.6-1) umfaßt den Gebäudeanschluß mit Hausanschlußsicherung und das Leitungsnetz bis zu den Verbrauchern. Die Stromzuführung kann mit Ein-, Zwei- oder Dreiphasenspannung erfolgen.

Die *Hausanschlußsicherung* verhindert das Übergreifen von Störungen in der Gebäudeanlage auf das Ortsnetz. Die *Hauptverteilungslei-*

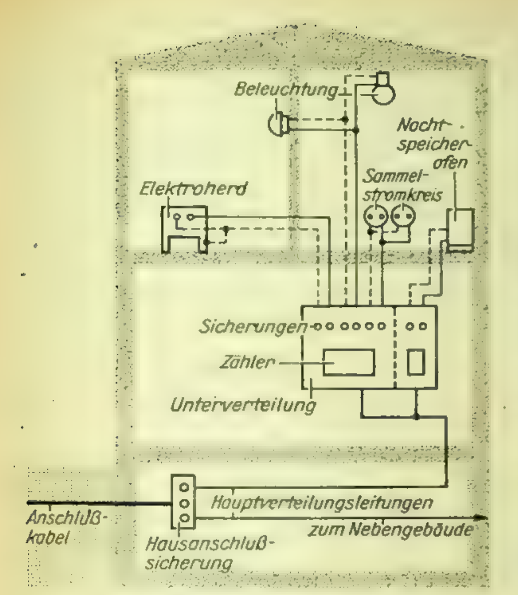


Abb. 15.9.6-1 *Elektrische Anlage des Gebäudes*

tung verteilt die Energie auf Gebäudeteile, wie Haupt-, Seitenflügel, Nebengebäude u. a., auf Nutzungsbereiche, z. B. für Beleuchtungszwecke oder elektromotorische Antriebe, und auf unterschiedliche Kostenzurechnungsbereiche.

In den *Unterverteilungen* werden die zu den Bereichen führenden Leitungen in Verbraucherstromkreise, z. B. Beleuchtung und Kraftstrom, aufgegliedert. Für fest installierte Geräte, z. B. Elektroherde, Kühlschränke, Motoren, ist je ein gesonderter Stromkreis mit entsprechender Absicherung, und für Kleingeräte, z. B. Bügeleisen, Tauchsieder u. ä., ein Sammelstromkreis mit Absicherung (meist 10 A) zu installieren.

Zähleinrichtungen zur Bestimmung und Abrechnung des Stromverbrauchs werden bei Großgebäuden meist nahe der Hauptleitungsverteilung oder bei Geschoßwohnungen nahe der Einzelwohnung angeordnet und entsprechend der Nutzungsbereiche funktionell unterteilt.

Zum Schutz des Menschen vor Stromeinwirkung müssen *Schutzmaßnahmen* vorhanden sein (vgl. 11.3.4.). Bei der Gestaltung der Elektroenergieversorgungsanlagen sind die geltenden gesetzlichen und Sicherheitsbestimmungen sowie die unterschiedlichen Anforderungen von Wohnungen, Industrie- und Gesellschaftsanlagen zu beachten. Außer den Anlagen zum Betreiben von Geräten und zur Beleuchtung gehören zur Gebäudeausrüstung mit Elektroenergie die Anlagen der Übertragungstechnik, wie Fernsprech-, Fernschreib-, Dispatcher-, Signalanlagen u. a., sowie Antennen- und Blitzschutzanlagen.

15.9.7. Müllbeseitigungsanlagen

Müll ist der Sammelbegriff für feste Abfallstoffe von Haushalten, Straßen, Gewerben und Industrie. Müllbeseitigungsanlagen sind Einrichtungen zum Einsammeln, Befördern, Behandeln und Ablagern von Müll.

Der Hausmüll wird von der Entstehungsstelle entweder von Hand oder von einer *Müllschluckanlage* (Abb. 15.9.7-1) zu den Sammelbehältern transportiert und zentral abgefahren. Die Müllbehandlung kann durch Müllverbrennung, -vergasung, -zerkleinerung, -kompostierung und -deponie erfolgen. In *Müllverbrennungsanlagen* wird bei Temperaturen von 800 bis 1000 °C der Müll verbrannt, und die anfallenden Rückstände, wie Schlacke und Flugasche, sowie im Verbrennungsprozeß frei werdende Wärme können genutzt werden. Zur Beseitigung von hohen Gummi- und Plastanteilen kann die *Müllvergasung* bei > 1000 °C durchgeführt werden. Die *Müllzerkleinerungsanlagen* werden als eine Vorstufe der Müllverbrennung, -kompostierung und -deponie eingesetzt. Bei der *Müllkompostierung* wird mit geringem Aufwand vorwiegend organischer Müll durch biologisch-chemische Verfahren in Humus umgesetzt, der in der Land- und Forstwirtschaft verwendet wird. Die *Mülldeponie* wird entweder nach der Muldenmethode (Auffüllen von Geländevertiefungen) oder der Bergmethode (Ablagerung auf ebenen Flächen) mit abwechselnder Schichtung von Müll und Abdeckmaterial durchgeführt. Dieses Verfahren ist flächenaufwendig, erfordert aber die geringsten Investitionskosten.

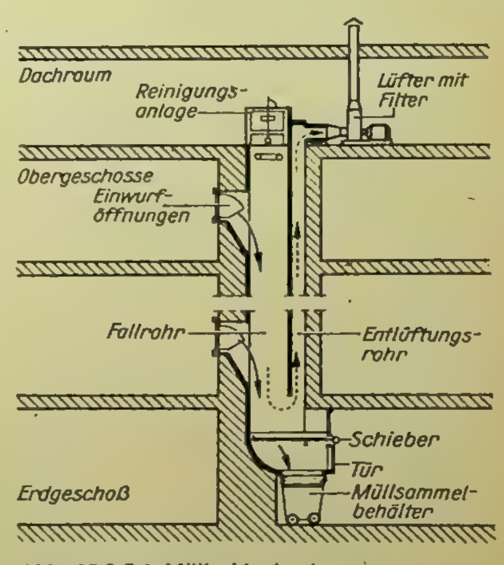


Abb. 15.9.7-1 *Müllschluckanlage*

15.9.8. Weitere Anlagen der TGA

Die TGA beinhaltet auch Speicherbehälter für Warmwasser, Aufzüge für den Personen- und Gütertransport, Fassadenlifts zur Gebäudereinigung und -reparatur. Bei der industriellen Gebäudenutzung zählen auch Hebezeuge, Transportanlagen, Klär- und Absetzbecken, Drucklufterzeugungs- und -verteilungsanlagen, Anlagen für technische Gase u. a. zur TGA.

15.10. Wasserwirtschaft — Wasserbau

15.10.1. Wasserwirtschaft

Ohne Wasser ist kein Leben möglich. Der Mensch benötigt es zur Nahrung und Reinigung, als Hilfsmittel und Rohstoff für Gewerbe, Industrie und Landwirtschaft. Die Entfaltung des Lebens hängt weitestgehend vom Wasser ab. Daneben tritt das Wasser aber auch als Feind auf und erfordert entsprechenden Schutz.

Wasserwirtschaftliche Maßnahmen sind alle diejenigen, die zur Regelung und zum Ausgleich zwischen dem *Wasserdargebot* der Natur durch den Kreislauf des Wassers und dem *Wasserbedarf* der Volkswirtschaft (sowohl der Menge als auch der Beschaffenheit und dem Zeitpunkt nach) und zum Schutz vor dem Wasser dienen. Solche Maßnahmen sind z. B. Erfassung des Wasserdargebots und -bedarfs, Nutzung des Wassers als Trink- und Betriebswasser (Wasserversorgung), Sammlung des Abwassers (Kanalisation) und Abwasserbehandlung, landwirtschaftliche Bodenent- und -bewässerung (Hydromelioration), fischereiliche Wasserwirtschaft, Hochwasserschutz und Speicherwirtschaft, wasserwirtschaftliche Landschaftsgestaltung (Umweltschutz). Wasserbauliche Maßnahmen, wie Fluß-, Verkehrswasser-, Wehr-, Speicher-, Wasserkraftanlagenbau, sind in die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen einzuordnen. Das Wasser hat vielfältige Nutzer mit z. T. entgegengesetzten Ansprüchen. Es ist deshalb eine *Wasserbewirtschaftung* notwendig.

15.10.2. Wasserversorgung

Beschaffenheit und Bedarf. *Natürliches Wasser* unterscheidet man in Niederschlags-, Oberflächen- und Grundwasser. Es kann enthalten: *grobe Verunreinigungen* (Sink-, Schwebe-, Schwimmstoffe), *kolloidale Verunreinigungen* (organische Stoffe, z. B. Öle, Fette), *molekulare Verunreinigungen* (z. B. Eisen, Mangan, Ammoniak, Nitrate, Nitrite), *gasförmige Verunreinigungen* (z. B. Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff). Echtes *Grundwasser* ist in der Regel hygienisch einwandfrei, oft hart und hat hohen Eisen- und Mangangehalt. *Oberflächenwasser* unterliegt sehr den Temperaturschwankungen und ist meist durch eingeleitetes Abwasser verunreinigt und hygienisch bedenklich.

Anforderungen an die Wasserbeschaffenheit richten sich nach dem beabsichtigten Verwendungszweck. *Trinkwasser* erfordert höchste hygienische Reinheit und die Einhaltung bestimmter Grenzwerte, *Kesselspeisewasser* höchste chemische Reinheit. Manche Beimengungen sind schädlich, manche verdächtig, einige unschädlich, andere beeinträchtigen den Geschmack. Trinkwasser soll bzw. muß frei sein von Nitriten, Nitraten, Phosphaten, Ammoniak, Schwermetallen, Phenolen, Arsen u. a. sowie krankheitserzeugenden Keimen. Die *Gesamthärte* setzt sich zusammen aus der durch Abkochen ausscheidbaren *Karbonathärte* und der *Resthärte*. Der Härtegrad ist wichtig für die gewerbliche und industrielle Verwendung des Wassers. Erstrebt wird ein *Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht*.

Der Wasserbedarf steigt ständig durch Zunahme und Ballung der Bevölkerung, des Lebensstandards (Bad, Wasserklosett), der Industrialisierung, der Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen sowie der Konzentration moderner Viehhaltungen. Der *Wasserverbrauch* schwankt innerhalb eines Jahres, der Jahreszeiten und selbst eines Tages beträchtlich. Er ist bei Siedlungen verschieden groß und hängt u. a. von der Siedlungsgröße, dem Ausstattungsgrad der Wohnungen sowie dem Anteil der Gewerbe- und Industriebetriebe ab (Kleinstädte etwa 150 l, Großstädte 300 l je Einwohner und Tag als Mittelwert). Zur Deckung besonders des Spitzenverbrauchs ist Kreislauf- und Mehrfachnutzung nach zwischengeschalteter Reinigung notwendig.

Wassergewinnung. Zur zentralen Wasserversorgung wird natürliches, uferfiltriertes oder *künstliches Grundwasser*, *Oberflächenwasser* aus Fließgewässern, Seen, Speicheranlagen und *Quellwasser* herangezogen.

Grundwasser füllt die Hohlräume des Bodens zusammenhängend aus und wird durch einsickernde Niederschläge gebildet, die durch undurchlässige Schichten — *Wasserstauer*, wie Lehm und Ton — aufgehalten werden. Dadurch entstehen *Grundwasserstockwerke*, *Grundwasserseen* oder — bei vorhandenem Gefälle — *Grundwasserströme*. Gute Grundwasserleiter sind kiesige Sande und breite *Urstromtäler*. Grundwasser, das zwischen 2 undurchlässigen Schichten unter Druck steht, heißt *gespanntes* Grundwasser. *Artesisches Grundwasser* ist es, wenn der Druck ausreicht, um die Erdoberfläche selbständig bzw. nach Durchbohren der Deckschicht zu erreichen. Sonst tritt das Grundwasser in Quellen zutage.

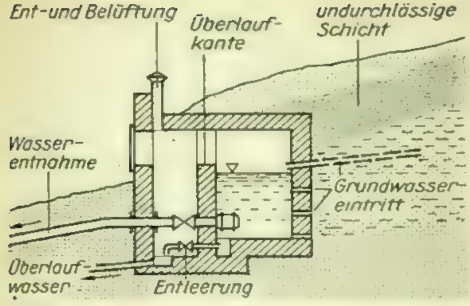


Abb. 15.10.2-1 Brunnenstube

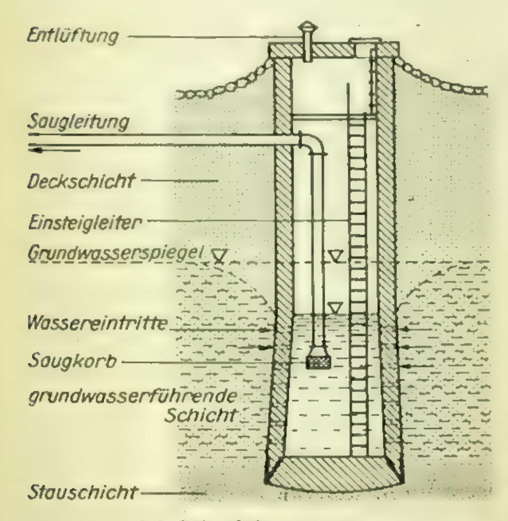


Abb. 15.10.2-2 Schachtbrunnen

Grundwasserfassung durch Brunnen. Zur Wasserversorgung wird das Grundwasser gefaßt, eine Quelle z. B. in einer *Brunnenstube* (Abb. 15.10.2-1). In Grundwasser führende Schichten bringt man *Brunnen* nieder. Die älteste, auch heute noch angewandte Form, ist der *Schachtbrunnen* (Abb. 15.10.2-2) aus Mauerwerk, Betonringen oder Ortbeton. Das Grundwasser tritt durch die offene Brunnensohle und/oder durch Aussparungen im unteren Teil der Wandung ein.

Bohrbrunnen sind in das Grundwasser abgeteufte lotrechte Bohrungen. Bei *Flachbrunnen* wird das Wasser durch oben stehende Pumpen oder durch Heberleitungen zutage gefördert, bei *Tiefbrunnen* durch Unterwassertauchpumpen. Die Brunnenwandung besteht im Grundwasserleiter aus *Filterrohren* aus Keramik, korrosionsbeständigem Stahl oder Plast. Damit bei der Entnahme keine Versandung eintritt, werden um die Rohre Filterschichten aus Sanden und Kiesen abgestimmter Korngröße geschüttet (vgl. Abb. 1.2.1-1). Die kleinste Form des Bohrbrunnens ist der mit einer Handpumpe betriebene *Rammbrunnen*. Der *Horizontalfilterbrunnen* ist ein Hochleistungsbrunnen. Aus einem dichten Sammelschacht werden im unteren Teil waagerecht eingepreßte Spezialfilterrohre sternförmig in den Grundwasserleiter vorgetrieben.

Künstliches und uferfiltriertes Grundwasser. Durch *Sickerbecken* und *-brunnen*, auch Gräben und Dränstränge, kann Oberflächenwasser zur Versickerung gebracht werden; es wandert durch den Boden, der die Temperatur vergleichmäßigt, eine Reinigungswirkung und ein Speichervermögen besitzt. Durch Brunnen wird es als *künstliches Grundwasser* gefördert. Brunnen in Nähe von Flüssen und Seen liefern neben echtem Grundwasser auch durch die Uferzone filtriertes Oberflächenwasser als *uferfiltriertes Grundwasser*.

Oberflächenwasser nennt man das Wasser, das auf der Erdoberfläche in Flüssen, Seen, Speicheranlagen, wie Talsperren und Flachlandspeichern, verfügbar ist oder direkt bei Niederschlägen gesammelt wird.

Flußwasser, zeitlich ungleich vorhanden, ist meistens mittel bis stark verunreinigt. Es bedarf deshalb einer besonderen Aufbereitung oder unterliegt einer eingeschränkten Nutzung. Es wird in einem am oder im Fluß liegenden *Einlaufbauwerk* (Abb. 15.10.2-3) gefaßt und zur Reinigungsanlage oder auch direkt zum Verbraucher

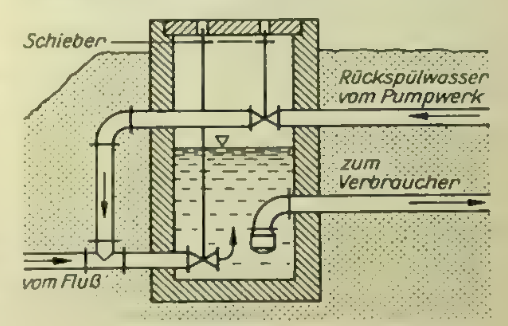


Abb. 15.10.2-3 Einlaufbauwerk am Flußufer

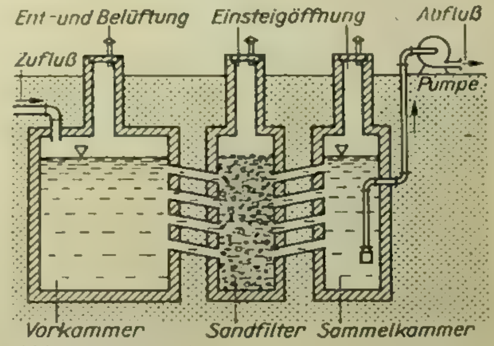


Abb. 15.10.2-4 Zisterne

geleitet. Unbeeinflußtes Seenwasser ist auch als Trinkwasser oftmals ohne Behandlung geeignet, sofern es möglichst weit vom Ufer entfernt und aus größeren Tiefen entnommen wird. Ihm gleichzusetzen ist *Talsperrenwasser*, dessen Umgebung geschützt ist (Schutzzone). *Niederschlagswasser* wird unter bestimmten Verhältnissen in unterirdischen Behältern, *Zisternen* (Abb. 15.10.2-4), gespeichert. *Meereswasser* ist wegen seines großen Salzgehalts zur direkten Wasserversorgung ungeeignet. Seine Aufbereitung, auch für Trinkwasser, ist möglich und wird in Sonderfällen (z. B. Versorgung von Schiffen, Inseln) schon durchgeführt, erfordert aber einen sehr hohen Energieaufwand.

Aufbereitung. Das für den Verbraucher bestimmte Wasser muß seiner Herkunft nach und seinem Verwendungszweck entsprechend mehr oder weniger stark gereinigt werden. Das geschieht in Wasseraufbereitungsanlagen (*Wasserwerk*).

Physikalische Verbesserung. Das Wasser wird durch Sieben, Absetzen, Filtern und Entgasen gereinigt. Mittels *Sieben* lassen sich nur grobe Teilchen entfernen. Beim *Absetzverfahren* passiert das Rohwasser einen Rechen und durchfließt dann langsam ein Becken, wobei feine Schmutzteilchen zu Boden sinken.

Fällungsmittel, wie Aluminium-, Eisensalze u. a., beschleunigen diesen Vorgang. Schwebstoffe und teilweise auch Bakterien werden durch *Filterung* zurückgehalten. Der *Langsamfilter* ist ein mit Kies und Sand gefülltes Becken, das vom Wasser vertikal durchflossen wird. Meistens verwendet man *Schnellfilter* mit gröberem Korn und Rückspülung; bei offenen Schnellfiltern fließt das Wasser aufgrund der Schwerkraft durch die Filterschicht oder bei *Mehrschichtfiltern* durch die Filterschichten, in geschlossenen Schnellfiltern wird es unter Druck hindurchgepreßt (*Druckfilter*). Die Reinigungswirkung wird durch den Einsatz von *Aktivkohle* in den Filtern erheblich verbessert. Zur Entgasung wird das Wasser in einen gut durchlüfteten Turm verrieselt, verregnet oder verdüst.

Chemische Verbesserung. Hierzu wird das Wasser von echt gelösten Stoffen, wie Kohlendioxid, Eisen- und Manganverbindungen, Karbonaten u. a., befreit. Das *Entsäuern* geschieht durch Verrieseln bzw. Verdüsen (Entfernung von überschüssigem Kohlendioxid) oder in Schnellfiltern, die mit einem körnigen Chemikal (z. B. Decarbolith) gefüllt sind. Beim *Kalkhydratverfahren* wird dem Rohwasser Kalkmilch dosiert zugesetzt. Zur *Enteisenung* und *Entmanganung* wendet man das Verregnen, Verrieseln oder Verdüsen in *Belüftungstürmen* (Abb. 15.10.2-5) mit nachfolgender Passage von Absetzanlagen oder Schnellfiltern an. *Enthärtung* ist für be-

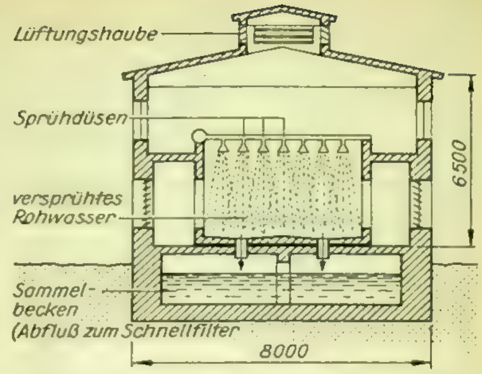


Abb. 15.10.2-5 Verdüsungsanlage (Belüftungsanlage)

stimmte Industriebrauchwässer notwendig. Die Karbonathärte wird durch Zugabe von Kalkmilch, die Nichtkarbonathärte durch Sodazugabe beseitigt. Ionenaustauscher, z. B. Wofatite, enthärten durch Kationen- bzw. Anionenaustausch. Weitere Bestandteile, vor allem Geruchs- und Geschmacksstoffe, können durch intensives *Belüften*, starken Chlorzusatz (*Hochchloren*) oder Filtern durch *Aktivkohle* entfernt werden.

Bakterielle Verbesserung. Das Entkeimen, letzte Stufe der Trinkwasserreinigung, geschieht in der Regel durch *Chloren*; beim Endverbraucher muß noch mindestens 0,1 mg Chlor je Liter Reinwasser nachweisbar sein. Eine Entkeimung kann auch durch Abkochen, Zusatz von Ätzkalk oder Silberionen und durch Ozon (*Ozonierung*) geschehen.

Wasserspeicherung. Um die Förder- und Verbrauchsschwankungen auszugleichen und den vorgesehenen Versorgungsdruck im Verteilernetz zu erzielen, speichert man das Wasser in *Hochbehältern*. Je nach Bebauungshöhe beträgt der *Versorgungsdruck* für Wohnhäuser ≈ 15 bis 40 m Druckhöhe. Hochhäuser erhalten eigene Druckerhöhungsanlagen. Die Hochbehälter sorgen weiterhin für eine *Löschwasser-* und *Havariereserve*, decken Bedarfsspitzen, gleichen Druckschwankungen im Rohrnetz aus und ermöglichen eine wirtschaftliche Rohrbemessung.

Als *Erdhochbehälter* bezeichnet man unterirdische Speicherbecken auf Hochpunkten im Gelände. Im Flachland versehen *Wassertürme* (Abb. 15.10.2-6), für kleinere Verhältnisse Aluminiumbleikugelbehälter (*Hydro-* bzw. *Aquagloben*), diese Aufgaben. Bei kleinen Anlagen ohne Hochbehälter werden Ausgleich und Druckerzeugung durch Druckkessel (*Hydrophore*) übernommen. *Feuerlöschteiche* werden im Bedarfsfall über- oder unterirdisch angelegt und durch Gewässer, durch Regenablauf oder auch aus dem Versorgungsnetz gespeist.

Wasserverteilung. Aus dem Hochbehälter fließt das Wasser durch das Rohrnetz zum Verbrau-

cher, geregelt und verteilt durch *Armaturen* (Schieber, Hydranten u. a.) und gemessen durch *Wasserzähler*. An den oberen Knickpunkten der Rohrleitungen sind selbsttätige *Rohrentlüfter*, an den Tiefpunkten *Entleerungsschieber* angebracht. Die Rohrleitungen beanspruchen mehr als 50 % der gesamten Anlagekosten einer zentralen Wasserversorgungsanlage. Sie zu pflegen, zu reinigen und instand zu halten ist eine der wichtigsten Aufgaben der Wasserwirtschaftsbetriebe. Durch den Bau von Sammelkanälen (*Kollektoren*) für verschiedene Versorgungsleitungen versucht man, für die Wohnungserschließung günstigere Bedingungen auch für die Unterhaltung der Rohrnetze zu schaffen. Zur besseren Überwachung – vornehmlich der Aufbereitungsanlage – werden mitunter mehrere kleine Anlagen zu einem *Gruppenwasserwerk* und mehrere Versorgungsnetze zu einem *Verbundnetz* zusammengeschlossen. Der Erschließung großer Räume, auch über mehrere Einzugsgebiete, dienen die *Fernwasserversorgungen*.

15.10.3. Abwasserbeseitigung

Abwässer sind Schmutzwässer. Dazu gehören häusliche, gewerbliche, industrielle Abwässer, auch nur thermisch belastete Abwässer und Abwässer landwirtschaftlich-industrieller Betriebe sowie Fäkalien, Wasser öffentlicher Brunnen, Kanalspülwasser, in undichte Leitungen eindringendes Grundwasser und Oberflächenwasser. Das Abwasser, in bebauten Gebieten auch das Niederschlagswasser, muß in einer *Kanalisation* zusammengefaßt und aus dem Siedlungsgebiet schadlos herausgeleitet werden. Die Abwässer bedürfen in der Regel einer Reinigung, bevor sie in die Vorfluter eingelassen werden können (*Wassergesetz*, *Landeskulturgesetz*).

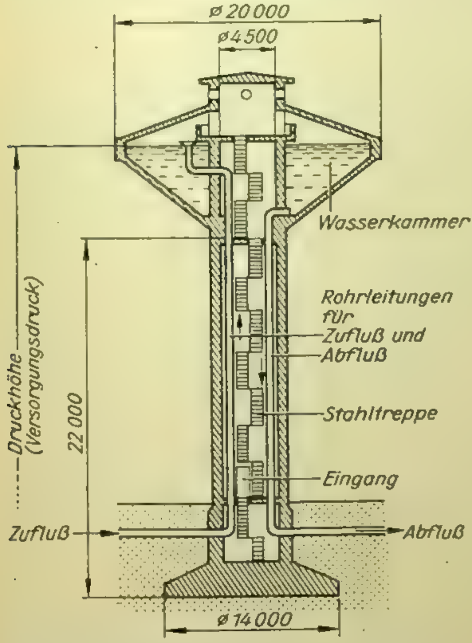


Abb. 15.10.2-6 Stahlbeton-Wasserturm mit 1100 m³ Fassungsvermögen

Beschaffenheit des Abwassers. Die Abwässer enthalten gelöste, kolloidale und feste *Verunreinigungen*, die in frischem Zustand nahezu geruchlos, bei *Trockenwetterabfluß* (regenlose Tage) in einer Mischkanalisation aber konzentrierter als bei Regenwetter sind und dann zu mehr oder weniger starker Geruchsbelästigung und Anfaulung führen. Werden alle Fäkalien abgeführt, so beträgt der durchschnittliche Gehalt des häuslichen Abwassers 12 g Stickstoff, 7 g Kalium und 3,5 g Phosphorsäure je Einwohner und Tag. Abwasser enthält oftmals auch sperrige Verunreinigungen, Fremdkörper, Müll und Sand. Durch menschliche und tierische Abgänge gelangen ferner *Parasiten*, besonders Spulwürmer, und *pathogene Keime*, wie Typhus-, Ruhr-, Cholera-, Milzbrandbakterien u. a., in das Abwasser, die *Seuchen* hervorrufen können. Mit dem gewerblichen und industriellen Abwasser kommen stark sauerstoffzehrende und giftige Stoffe sowie Säuren, Basen, Salze, Schlamm, Phenole u. a. in den Vorfluter. Dadurch kann er über seine *Selbstreinigungskraft* hinaus beansprucht werden, so daß das tierische und pflanzliche Leben in ihm sogar zum Erliegen kommen kann.

Das städtische Abwasser u. a. organisch belastete Abwässer sind fäulnisfähig. Die durch fäulnisfähige Stoffe hervorgerufene Verschmutzung wird durch den *biochemischen Sauerstoffbedarf* beschrieben, d. h. durch die zu seiner biochemischen Selbstreinigung notwendige Sauerstoffmenge. Die Verschmutzung durch organisches industrielles Abwasser kann in etwa durch den *Einwohnergleichwert* vergleichbar gemacht werden. Dieser Zahlenwert gibt an, durch wieviel Einwohner dieselbe o. ä. Verschmutzung bewirkt wird. Die hierdurch verursachte Verunreinigung der Gewässer ist aber durch weitere schädigende Beimengungen und bei stoßartiger Einbringung weitaus größer einzuschätzen. Durch Waschmittel treten weiterhin zunehmend detergenzienbehaftete *Waschabwässer* auf. Durch die Chemisierung der Volkswirtschaft und die Industrialisierung der landwirtschaftlichen Pflanzen- und Tierproduktion wird in Zukunft die Belastung der Gewässer weiter ansteigen. Dem muß durch verbesserte Technologien (geschlossene Kreisläufe), entsprechende Abwässeraufbereitungsanlagen u. a. entgegengewirkt werden.

Abwassermenge. Der Anfall von Schmutzwasser hängt u. a. von der Wohnungsausstattung, vom

Wasserpreis, vor allem von Art, Größe, Technologie und technischer Ausrüstung der Gewerbe- und Industriebetriebe ab. Die *Abwasserganglinie* beschreibt die Schwankungen innerhalb eines Zeitabschnitts, sie entspricht etwa der Wasserverbrauchslinie.

Fortleitung. Nach der Art der Ableitung der Abfallstoffe aus der Siedlung unterscheidet man das unvollkommene Verfahren des Entfernens durch *Abfahren* mit Fahrzeugen (Gesamtabfuhr der Abwässer bzw. Tonnen- und Grubensystem) und das vollkommene Verfahren der *Schwemmkanalisation*, bei dem die Abfallstoffe mit Wasser „ausgeschwemmt", d. h. zur Reinigungsanlage oder zum Vorfluter transportiert werden. Man unterscheidet hierbei das *Mischsystem* – Abwasser und anfallendes Regenwasser werden in *einer* Leitung gesammelt und fortgeleitet – und das *Trennsystem* mit 2 getrennten Netzen. *Abwasserableitungen* werden fast ausnahmslos als *Freispiegelleitungen* (drucklose Leitungen) gebaut, die nur teilweise gefüllt sind. Bei Regenwasser tritt eine größere Wassermenge und eine große Wassergeschwindigkeit auf, so daß zeitweilige Ablagerungen dann mit ausgeschwemmt werden. Bei längerem Trockenwetterabfluß und geringem Leitungsgefälle kann es dagegen vorkommen, daß die Ablagerungen liegenbleiben und Fäulniserscheinungen zu Geruchsbelästigung führen. Für Abwasserleitungen verwendet man bei kleinen Durchmessern *Keramikrohre*, die sehr säure- und korrosionsbeständig sind, bei großen Durchmessern *Betonrohre* und falls Druckrohrleitungen notwendig werden, *Stahlbeton-*, *Schleuderbeton-* oder *Asbestzementrohre*.

Leitungsprofile. Bei vollaufenden – d. h. im gesamten Querschnitt nutzbaren – Leitungen wird das Kreisprofil, bei offenen Leitungen das *Halbkreisprofil* verwendet. Bei zeitweilig sehr geringer Wasserführung (Mischkanalisation, Trockenwetterabfluß) wird meist das *umgekehrte Eiprofil* gewählt, in Sonderfällen das *Eiprofil*, das *überhöhte Eiprofil*, das *Rechteckprofil*, das *Tunnelprofil* u. a.

Leitungsführung. Die Leitungen müssen so tief verlegt werden, daß alle Kellersohlen ohne Rückstau entwässert werden können und Frostsicherheit vorhanden ist; die Mindesttiefe beträgt entsprechend von Straßenoberkante bis Wasserspiegelhöhe in der Leitung ≈ 3 m in den Straßen der Großstädte, 2,5 m bei Wohnstraßen in Kleinstädten und 2 m bei Landgemeinden. Die Entwässerungsleitungen sind i. allg. in der Mitte der Fahrbahn verlegt. Das Niederschlagswasser wird alle 40 bis 50 m durch *Straßeneinläufe* (*Gullys*) zugeführt, die gleichzeitig der Belüftung des Abwassers dienen. Zum Kontrollieren, Unterhalten, Spülen und Reinigen werden an Straßeneinmündungen, an den Enden der Leitungen

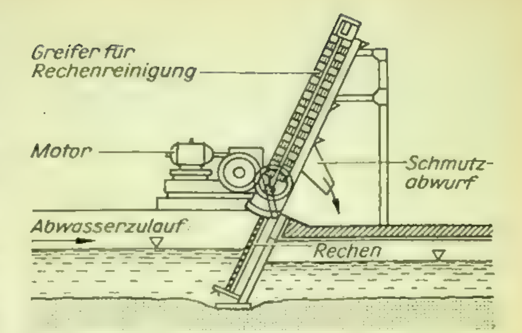


Abb. 15.10.3-1 Greiferrechen

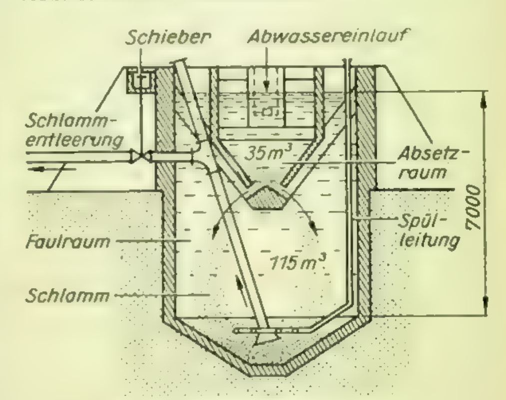


Abb. 15.10.3-2 Emscherbrunnen

und in geraden Strecken etwa alle 50 m *Einsteigeschächte* angeordnet.

Zusatzeinrichtungen. Zur Entlastung der Pumpwerke und Reinigungsanlagen (Klärwerke) dienen beim Mischsystem *Regenüberfälle* und *Notauslässe* im Sammler, von denen das Abwasser bei starkem Regen unmittelbar dem Vorfluter zufließt. Die Abwasserleitungen werden an Kreuzungen mit Wasserläufen, Untergrundbahnen oder Versorgungsleitungen durch *Düker* unter diesen hindurch- oder durch *Heberleitungen* darüber hinweggeführt. Bei fehlendem Vorfluter (Tiefgebiete, Polder) sind *Abwasserhebewerke* mit besonderen Schmutzwasserpumpen notwendig.

Abwasserbehandlung. Verschmutzte Gewässer reinigen sich bei Sauerstoffmangel durch *Fäulnis* (anaerobe Vorgänge), bei sauerstoffhaltigem Wasser durch Abbau (aerobe Vorgänge) von selbst (*Selbstreinigung der Gewässer*). Das Wasser der meisten unserer Flüsse ist jedoch kaum noch ohne künstliche Reinigung irgendwie nutzbar. Mitunter genügt eine Unterstützung der Selbstreinigungskraft durch Anlegen von Stauseen (*Flußreinigungsanlagen*) und Speicherbekken, Erhöhen der Niedrigwasserführung, künstliches Belüften, Spülen mit einer künstlichen Hochwasserwelle aus Speicheranlagen u. a. Meist ist jedoch eine Reinigung des gebrauchten

Wassers (Abwassers) in einer Kläranlage unumgänglich.

Kläranlagen. Die Behandlung des Abwassers in der Kläranlage ersetzt einen Teil der natürlichen Reinigung in den Gewässern, ahmt diese nach und rafft sie zeitlich zusammen.

Mechanische Reinigung. Sie umfaßt die Reinigung durch *Grob-* und *Feinrechen* (Abb. 15.10.3-1), *Sand-*, *Fett-* und *Ölfänge*. *Sandfänge* — ausgebildet als Lang-, Tief-, Quer- oder Rundsandfänge — entziehen mitgespülten Sand.

Die *Entschlammung* des Abwassers geschieht durch *Siebanlagen* (Mikrosiebe) und *Absetzbecken*. Durch einstöckige Absetzanlagen können bis zu 60 % der Gesamtschwebestoffe, d. h. 95 % der absetzbaren Schmutzstoffe, bei einer Verweilzeit von ≈ 1 bis 2 Stunden im Becken ausgeschieden werden. Gebräuchlich sind horizontal (Rechteck-, auch Rundbecken) und vertikal durchflossene Becken. Der ausgeräumte und der Schwimmschlamm werden in besonderen *Faulräumen* oder offenen *Erdfaulbecken* ausgefault. Bei zweistöckigen Anlagen (Abb. 15.10.3-2) fault der Schlamm in einem unter dem Absetzraum liegenden Faulraum aus.

Chemische Reinigung. Hierzu gehört bei Industrieabwässern z. B. die *Neutralisation* und *Entgiftung*. Durch Flockung bzw. Fällung mittels Chemikalienzugabe kann der Absetzvorgang verbessert oder erst erreicht werden und ansonsten nicht absetzbare Stoffe zur Absetzung gebracht werden. In Zukunft werden diese Verfahren noch an Bedeutung gewinnen, besonders bei der Reinigung von Industrieabwässern.

Biologische Reinigung. Durch biologische Reinigung werden die noch gelösten Stoffe, die größtenteils organischer Art und deshalb fäulnisfähig sind, abgebaut. Die *natürliche biologische Reinigung* geschieht in Flußklär-(Absetz-)Anlagen oder durch Aufbringen (Berieselung, Beregnung) auf den Boden, wobei der Boden die Reinigungsleistung durch Absorption, Adsorption und Kleinlebewesen übernimmt (*landwirtschaftliche Abwasserverwertung*). Das gereinigte Wasser gelangt, sofern es nicht von den Pflanzen verbraucht wird, über das Grundwasser bzw. durch Verdunstung in den Wasserkreislauf zurück. Durch landwirtschaftliche Verwertung der häuslichen sowie bestimmter gewerblicher und industrieller Abwässer — ebenfalls auch entsprechend aufbereitete Gülle — werden ein guter Schutz der Gewässer und eine Steigerung der Hektarerträge durch den Wasser- und Dungwert erreicht, wobei hygienische Schutzmaßnahmen streng zu beachten sind. Gut mechanisch vorgereinigtes Abwasser kann auch zusammen mit sauerstoffhaltigem Verdünnungswasser in *Fischteiche* geleitet werden, wo durch Pflanzen, Kleinlebewesen und Fische seine Inhaltsstoffe abgebaut werden.

Künstliche biologische Reinigung stellt eine künstliche Nachahmung der natürlichen dar, wobei die Schmutzstoffe durch physikalische, biochemische und biologische Vorgänge (Kleinlebewesen) unter ständiger Zufuhr von Luftsauerstoff abgebaut werden. Aus der Nachahmung des Bodenfilters ist der *Tropfkörper*

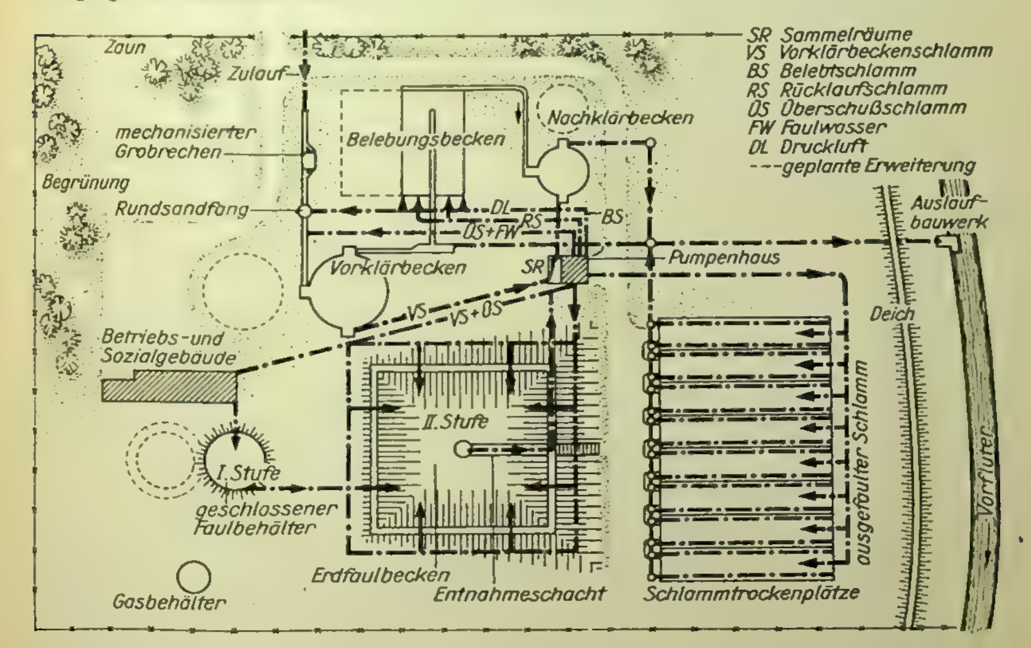


Abb. 15.10.3-3 Lageplan einer Kläranlage mit Belebungsanlage und zweistufiger Faulung

entstanden. Er enthält aufgeschichtete, vom Abwasser durchrieselte Steine, Schlackenstücke u. ä. Füllkörper, die sich mit einem biologischen Rasen überziehen. Ähnlich wirken *Tauchkörper*. Beim *Belebungsverfahren* wird das Abwasser mit Kleinlebewesen künstlich belebt, die die organischen Inhaltsstoffe abbauen. Eine reichliche *künstliche Belüftung* des mechanisch vorgereinigten Abwassers durch Druckluft, Rührwerk o. ä. ist notwendig. Das Abwasser durchläuft anschließend ein *Nachklärbecken*. Das Verfahren gilt als die vollkommenste Abwasserreinigung (Abb. 15.10.3-3). In Zukunft wird eine weitere Reinigungsstufe zur Feinreinigung des Abwassers erforderlich, vornehmlich zur Eliminierung von Phosphor- und Stickstoffverbindungen, die in Oberflächengewässern eine starke Nährstoffanreicherung (*Eutrophierung*) verursachen.

Industrieabwasser bedarf oftmals besonderer Behandlung.

Schlammbehandlung. Der Schlamm wird in *zweistöckigen Absetzanlagen*, in offenen *Erdfaulbecken* oder in *Faulbehältern* ausgefault. Zum Intensivieren der Vorgänge werden die Anlagen geheizt. Das sich bildende *Methangas* ist geruchlos und zu Heizzwecken verwendbar. Der ausgefaulte Schlamm wird auf *Schlammtrockenplätzen* oder auch künstlich getrocknet. Er ist ein wertvolles *Düngemittel* und kann auch mit Müll oder Torf *kompostiert* werden.

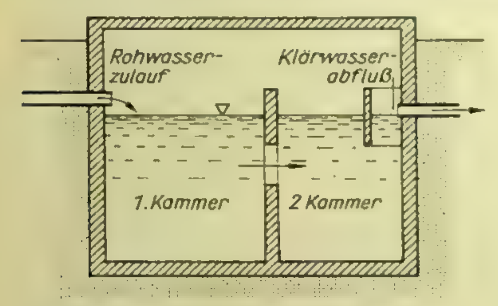


Abb. 15.10.3-4 Zweikammer-Kläranlage

Kleinkläranlagen. Bei abseits von Siedlungen liegenden Einzelhäusern und Gebäudegruppen, die sich nicht an eine Zentralkläranlage anschließen lassen, wird das häusliche Abwasser in einer Kleinkläranlage (Abb. 15.10.3-4) gereinigt. Sie ist aber nur als Notbehelf anzusehen.

15.10.4. Landwirtschaftlicher Wasserbau

Der landwirtschaftliche Wasserbau umfaßt alle wasserwirtschaftlichen und baulichen Maßnahmen, vornehmlich *Hydromeliorationen*, die die oberste humushaltige Bodenschicht beeinflussen, damit das natürliche biologische Gleichgewicht aufrechterhalten bzw. wiederhergestellt wird und die der Erhaltung und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit dienen.

Bodenentwässerung strebt durch künstliche Senkung des Grundwasserspiegels einen den Pflanzen günstigen Feuchtigkeitsgehalt an (optimale Regelung der Bodenwasserverhältnisse). Kulturwidrige Bodennässe wird durch Wasseransammlungen an der Oberfläche und wasserliebende Pflanzen angezeigt.

Grabenentwässerung. Hierbei wird das Wasser in offenen Gräben gesammelt und einem *Vorfluter* zugeführt, der z. T. ausgebaut werden muß.

Dränrohrentwässerung (*Dränung*). 33 cm lange Rohre aus gebranntem Ton werden auf der Sohle eines ≈ 1 m tiefen Grabens aneinandergelegt, der Graben wird dann wieder verfüllt. Das Wasser tritt durch die Stoßfugen des Dränstrangs (*Sauger*) in das Rohrinnere ein und wird in leichtem Gefälle zum Hauptleiter (*Sammler*) geführt. Statt Tonrohre können auch Kunststoffrohre verwendet werden. Liegen die Sauger in Richtung der Geländehöhenlinien, spricht man von *Querdränung*, liegen sie senkrecht dazu, von *Längsdränung*. Die *Entwässerungsgeschwindigkeit* und die *Dräntiefe* hängen vom Dränabstand der Sauger und von der *Bodendurchlässigkeit* ab.

Schöpfwerke sind Pumpwerke, die schadenbringende Wassermengen von landwirtschaftlich genutzten Niederungsflächen – oft durch Deiche geschützte Flächen (*Polder*) – „abschöpfen", wenn die natürliche Vorflut zur freien Entwässerung zeitweilig oder immer nicht ausreicht. Bei niedrigem Außenwasserstand kann auch durch *Siele* (Deichschleusen) entwässert werden.

Bodenbewässerung ist in ariden (trockenen) Gebieten die Voraussetzung jeglichen Anbaus; in humiden (feuchten) Gebieten dient sie der Ertragsicherung und -steigerung. Man unterscheidet *anfeuchtende Bewässerung* durch Klarwasser, *düngende Bewässerung* durch Abwasser, Gülle (dickflüssiges Gemisch aus vorgefaultem Kot, Harn und Wasser), Jauche, Zusatz von Mineraldünger und *Frostschutzberegnung*. Diese hat neben der Bewässerung den Zweck, jungen Pflanzen und Blüten von Gemüse, Obst und Weinreben durch kontinuierliche schwache Beregnung mit Wasser Wärme zuzuführen und dadurch in Frostnächten Schutz zu bieten.

Bewässerungsverfahren. Bei der *Staubewässerung* wird das dem Trockengebiet zugeführte Wasser in offenen Gräben gestaut, oft auch in Entwässerungsgräben, deren Entwässerungswirkung durch Einsetzen von Stauvorrichtungen zeitweise aufgehoben wird. Beim *Grabeneinstau* sind in einem oder mehreren Hauptgräben Stauschleusen angeordnet, von denen aus Grund- oder zugeleitetes Wasser in zahlreiche parallele Beetgräben geleitet und so gut verteilt wird. Von *Überstau* spricht man, wenn – meist

waagerechte – Flächen zeitweise bis zu 30 cm unter Wasser gesetzt werden (auch Nährstoffzuführung durch Abwasser vor dem Anbau). Bei der *Berieselung* wird das Wasser in einer dünnen Schicht über den leicht abfallenden Boden geleitet (*Furchenberieselung*, *Hangberieselung*).
Die *Beregnung* ist die günstigste Bewässerungsmethode, erfordert jedoch hohe Bau- und Wartungskosten, hohen Materialeinsatz und bedarf qualifizierter Bedienungskräfte. Sie wird nach einem Beregnungsplan durchgeführt, der die optimalen Beregnungszeiten für die einzelnen Pflanzen berücksichtigt.
Landerhaltung und -gewinnung. Kulturland muß vor Wind- und Wasserabtrag geschützt werden. Der *Erosionsschutz* wird durch Wald- und Baumpflege, biologische und technische Bauweise erreicht. Zur Kultivierung durch Regelung der Wasserverhältnisse kommen Nieder- und Hochmoore (Bodenentwässerung) sowie mineralisches Ödland, wie Heiden, Abraumkippen der Braunkohlentagebaue (Bodenbewässerung), in Betracht.
An der Nordseeküste wird der „Schlickschlamm" durch Schlickfänger (*Lahnungen*) zurückgehalten, durch Grüppen entwässert und dadurch Neuland dem Wattenmeer entrissen (Marschgebiete).

15.10.5. Flußbau

Aufgabe des *Flußbaus* ist der Ausbau und die Regelung der fließenden Gewässer zum schadlosen Abführen des Wassers und zu seiner maximalen Nutzung für die Trink- und Brauchwasserversorgung sowie für die Landwirtschaft, Energiewirtschaft und Schiffahrt. Zu den fließenden Gewässern gehören Bäche, Flüsse und Ströme. *Wildbäche* sind Wasserläufe im Gebirge mit großem Gefälle, die in trockenen Zeiten wenig oder gar kein Wasser führen, bei Regen stark anschwellen und dann viel Geschiebe transportieren.
Wildbachverbauung. Der Lauf des Wildbachs weist 3 Abschnitte auf: das *Sammelgebiet* (*Kessel*), die *Klamm* (Tobel oder Schlucht) und den *Schuttkegel* (Schotterkegel s. u.).
Hangsicherung. Um die Seitenhänge gegen Abtrag und Abrutschen zu schützen, werden bereits gelockerte Steinblöcke zum Absturz gebracht, Hanggräben zum Ableiten des Niederschlagswassers angelegt, Flechtzäune und Trokkenstützmauern errichtet und die Hangflächen bepflanzt.
Ausbau des Bachbetts. Die Bachsohle wird schalenförmig mit 60 bis 80 cm hohen Steinen ausgelegt und das Sohlengefälle durch Einbau von *Stufen*, *Grundschwellen* und *Geröllsperren* aus Rundholz, Bruchsteinmauerwerk oder Beton (Abb. 15.10.5-1) verringert.
Ausbau des Schuttkegels. Am Eintritt des Baches in das Flußtal lagert sich Geröll und Ge-

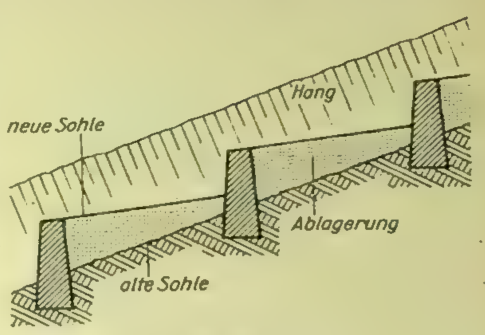


Abb. 15.10.5-1 Geröllsperren

schiebe als *Schutt-* oder *Schotterkegel* ab, der nach einiger Zeit land- und forstwirtschaftlich genutzt werden kann.
Flußregelung. Dazu gehören der Ausbau und die Verlegung von Flußläufen sowie ihre Regulierung auf Mittel-, Niedrig- und Hochwasser.
Linienführung. Sie ist so zu wählen, daß sich ein allmählicher Übergang von der Krümmung in die Gerade und umgekehrt ergibt. Zwischen gegensinnigen Bögen ist eine Gerade einzulegen. Der Verbesserung der Linienführung dienen auch das Beseitigen von Stromspaltungen und Durchstiche.
Querschnittsform (*Profil*). Am besten ist das Trapez geeignet, da es geringere Durchflußmengen stärker zusammenfaßt als große. In bebauten Gebieten wird aber aus Gründen besserer Flächennutzung das Rechteckprofil bevorzugt. Flachlandflüsse erhalten ein Doppelprofil aus einem unteren trapezförmigen Teil für den Mittelwasserabfluß und einem oberen breiteren Teil für den Hochwasserabfluß.
Uferbefestigung. Die Ufer werden gegen Abbruch und Unterspülung durch *Steinschüttungen* (Abb. 15.10.5-2), *Steinpackungen*, *Steinpflaster*, Betondecken, Ufermauern (Abb. 15.10.5-3a), *Bohlwände*, *Asphalt-* und *Rasenbeläge* (Abb. 15.10.5-3b), Faschinenmaterial sowie Lebendverbau gesichert. *Faschinen* sind Bündel aus Ruten und Reisern von Weiden, Erlen, Fichten u. a. *Senkfaschinen* (SinKwalzen) bestehen aus einer 15 bis 20 cm dicken Hülle aus



Abb. 15.10.5-2 Steinschüttung mit Steinwurf auf Filterunterbettung und anschließender Rasendecke

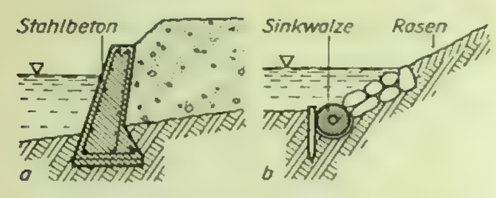


Abb. 15.10.5-3 a Ufermauer, b Sinkwalze mit Steinsatz und Rasenbelag

Faschinenreisern um einen Schotter- bzw. Steinkern. Sie sind 4 bis 6 m lang und haben einen Durchmesser von 60 bis 90 cm. Als *Lebendverbau* bezeichnet man die ingenieurbiologische Befestigung durch Gräser, Schilf, junges Weidengehölz u. a.

Flußbauwerke. Die natürliche Flußbreite wird häufig zur Verbesserung der Abflußverhältnisse durch Bauten eingeschränkt. *Deckwerke* begrenzen das Flußbett zu beiden Seiten und schützen die Ufer gegen Abbruch oder Beschädigung durch Wellen und Eis. Sie bestehen aus einer Stein-, Beton-, Asphaltabdeckung o. a. mit Kieshinterfüllung. *Leitwerke* sind in Fließrichtung angelegte dammartige Begrenzungsbauten des Durchflußquerschnitts, die auf beiden Seiten von Wasser benetzt sind. *Buhnen* sind dammartige Einbauten, die vom Ufer ausgehend unter einem Winkel von ≈ 75° gegen die Strömungsrichtung geneigt (inklinant) im Flußbett angeordnet werden, um den Abflußquerschnitt einzuengen. *Grundschwellen* sind Querbauten aus Schüttsteinen in Sohleneintiefungen (*Kolke*) des Flußbetts, die dessen weitere Vertiefung verhindern.

Flußkanalisierung. Kann durch Niedrigwasserausbau und mit Zuschußwasser aus Talsperren die für den wirtschaftlichen Schiffahrtsbetrieb erforderliche Mindestwassertiefe nicht

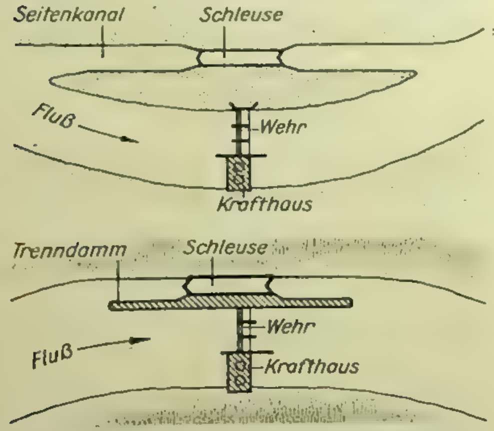


Abb. 15.10.5-4 Staustufe mit Schleuse, oben im Seitenkanal, unten am einbuchtenden Ufer

erreicht oder soll die Wasserenergie genutzt werden, so wird der Fluß kanalisiert, d. h. das Wasser an einzelnen Stellen durch Staustufen angestaut.

Staustufen bestehen aus einem Wehr und je nach Bedarf aus einer *Schiffs-* oder *Bootsschleuse*, einer *Floß-* oder *Bootsgasse* oder einem *Fischpaß*, der es den Fischen ermöglicht, vom Unterwasser schwimmend oder sich hochschnellend in das Oberwasser zu gelangen. Ist die durch das Wehr erzeugte Stauhöhe > 3 m, so besteht auch die Möglichkeit der Energiegewinnung in einem Wasserkraftwerk (vgl. 2.1.4.). Die günstigste Lage der Schleuse ist das einbuchtende Ufer (Abb. 15.10.5-4), da dort die Wassertiefe am größten und die Versandungsgefahr am geringsten ist. Durch Flußkanalisierung (Stauregelung) wird der Schiffahrtsbetrieb unabhängig von der jeweiligen Durchflußmenge. Durch den Anstau wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers und damit der Fahrwiderstand bei Bergfahrt kleiner. Die Fahrwassertiefe eines regulierten Flusses soll mindestens 20 cm, die eines kanalisierten Flusses 30 cm größer als die *Tauchtiefe* der Schiffe sein.

15.10.6. Verkehrswasserbau

Alle Wasserbaumaßnahmen, die der Schiffahrt dienen, dazu gehört in erster Linie der Bau von Schiffahrtskanälen mit Schiffahrtsschleusen und -hebewerken, werden unter dem Begriff *Verkehrswasserbau* zusammengefaßt.

Schiffahrtskanäle. Form und Größe des Kanalquerschnitts hängen in erster Linie von dem zu erwartenden Verkehr, von den Schiffsgrößen und vom Baugrund ab. Die häufigste Querschnittsform ist das Trapezprofil mit einer gegen die Mitte schwach geneigten Sohle. Die Wassertiefe beträgt mindestens das 1,75fache des Tiefgangs des beladenen Regelschiffs, die Kanalbreite in Höhe des Schiffsbodens (beladen) mindestens 3 Schiffsbreiten. Kanäle für Schiffe mit 1000 bis 1350 t Tragfähigkeit (Wasserstraßenklasse IV) haben eine Wassertiefe von 3,5 bis 4 m und eine Wasserspiegelbreite von 45 m auf Geradstrecken.

Ufersicherung und Dichtung. Die Kanalufer werden zum Schutz gegen Wellen mit Steinschüttungen, Betonformsteinen, Stahlbetonplatten, Bitumenbeton oder Asphaltmatten (auf Kies) abgedeckt oder mit einer Einfassung aus Stahlspundbohlen versehen. Die Ufersicherung soll 1 m über den ruhenden Kanalwasserspiegel hinaufreichen. Ist der Kanal über Gelände in einen Damm gebettet, so erhalten Sohle und Böschungen eine Dichtungsschicht aus Lehm (60 cm), Ton (30 cm), Hydraton (künstlicher Dichtungsstoff, 25 cm) oder Bitumenbeton (8 cm) sowie eine Schutzschicht.

Kanaltunnel. Muß der Kanal durch ein Gebirgsmassiv hindurchgeführt werden, so ist ein Tunnel

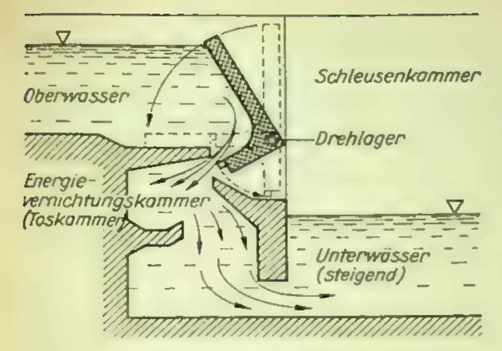


Abb. 15.10.6-1 Hafenklapptor

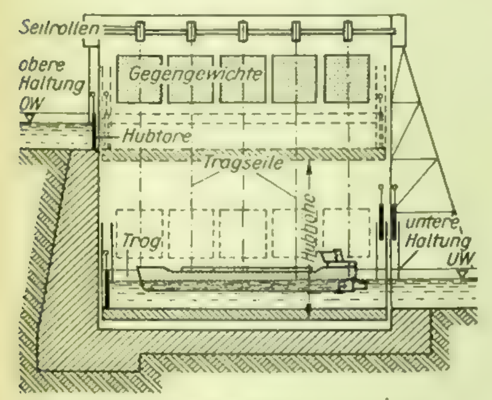


Abb. 15.10.6-2 Gegengewichts-Schiffshebewerk

anzulegen. Der größte bisher gebaute Kanaltunnel ist der zweischiffige Rovetunnel im Kanal Arles-Marseille mit 7 km Länge, 22 m Breite, 15 m Höhe und 4 m Wassertiefe.

Kanalbrücken (Kanalüberführungen) führen Schiffahrtskanäle über Talmulden, Wasserläufe und Verkehrswege. Sie bestehen aus einem rechteckigen Trog aus Stahlblech, der an beiden Enden an den Kanal angeschlossen ist. Die Kanalbrücke über die Weser bei Minden z. B. ist 371 m lang; der Trog hat 24 m Spiegelbreite und 2,50 m Wassertiefe.

Sicherheits- oder *Sperrtore* ermöglichen es, bei etwaigen Dammbrüchen und zur Trockenlegung einzelne Kanalabschnitte abzusperren. Der Zuleitung von Wasser dienen *Einlaßbauwerke* (Entlastungsanlagen).

Schiffsschleusen ermöglichen die Überwindung von Höhenunterschieden in den Wasserstraßen. An Hauptbinnenwasserstraßen haben sie eine Länge von 85 bis 350 m; die Normalbreite beträgt 12 m, an kanalisierten Flüssen auch 24 m. Die Hubhöhe liegt meist zwischen 6 und 12 m, z. Z. bei max. 42 m (Tafel 59). Die *Schleusenkammer* wird durch je ein *Ober-* und *Unterhaupt* mit Toren gegen das Ober- bzw. Unterwasser abgeschlossen. Die Schleusentore werden überwiegend als *Stemm-* oder *Hubtore*, im Oberhaupt häufig als *Dreh-* oder *Klapptore* (Abb. 15.10.6-1) ausgebildet. Füllen bzw. Entleeren der Kammer geschieht je nach deren Größe, dem Schleusenhub und der geforderten Schleusungsgeschwindigkeit durch verschließbare Öffnungen in den Toren, *Torumläufe* (Umlaufkanäle) in den Schleusenhäuptern, *Längs-* und *Stichkanäle* in den Kammerwänden oder *Grundläufe* in der Kammersohle.

Für große Hubhöhen werden Schacht-, Kuppelschleusen oder Schleusentreppen gebaut. *Schachtschleusen* haben mindestens 6 m Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser. Bei *Kuppelschleusen* liegen mehrere Schleusenkammern unmittelbar hintereinander, während sie bei *Schleusentreppen* durch 200 bis 500 m lange Zwischenhaltungen voneinander getrennt sind. *Zwillingsschleusen* bestehen aus 2 nebeneinanderliegenden Kammern, die zur Wasserersparnis durch einen Rohrkanal verbunden sind.

Schiffshebewerke sind an Schiffahrtskanälen bei einer Hubhöhe von > 16 m mitunter

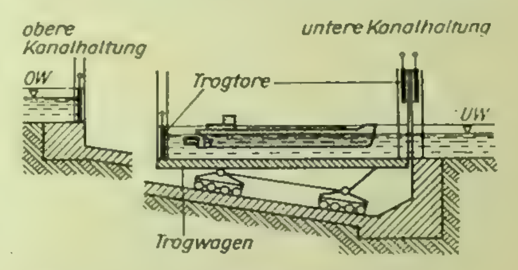


Abb. 15.10.6-3 Geneigte Längsebene; Trogwagen in unterer Endstellung

Tab. 15.10.6-4 *Bedeutende Schiffshebewerke*

Standort	Typ	Hubhöhe m	Schiffsgröße t	Trogabmessung m
Peterborough (Kanada)	D	19,8	800	42,7 × 10
Henrichenburg/Waltrop (BRD)	S (2)	13,7	1 350	90 × 12
Rothensee (DDR)	S (2)	18	1 200	85 × 12
Lüneburg (BRD)	G	38	1 350	2(100 × 12)
Niederfinow (DDR)	G	36	1 200	85 × 12
Ronquières (Belgien)	G, LE	67,5	1 350	90 × 12
Arzviller (Frankreich)	QE	44,6	350	42 × 5,50
Krasnojarsk (UdSSR)	LE	102	2 000	117 × 18
Orlik (ČSSR)	LE	71,5	300	33 × 6

wirtschaftlicher als Schleusen; sie haben den Vorteil des geringeren Wasserverlusts. Das Schiff wird meist in einem Trog schwimmend (Abb. 15.10.6-2), seltener trocken auf einer Plattform gehoben.
Druckwasserhebewerke (D) sind Doppelhebewerke mit kleinen Trögen, bei denen der zum Heben erforderliche Druck durch 2 mit Wasser gefüllte Preßzylinder auf den Trog übertragen wird. Bei *Schwimmerhebewerken* (S) ruht der Trog auf Schwimmern, die in mit Wasser gefüllte Schächte eintauchen und durch ihren Auftrieb das Troggewicht ausgleichen. Bei *Gegengewichtshebewerken* (G) brauchen nur die Reibungskräfte mechanisch überwunden zu werden. Neben diesen Vertikalhebewerken gibt es auch geneigte Längs- und Querebenen (LE, QE; Abb. 15.10.6-3, Tab. 15.10.6-4).

15.10.7. Seebau

Der *Seebau* umfaßt den Ausbau der Flußmündungen, alle Bauten zum Schutze der Küste (Küstenschutz), für die Seeschiffahrt (Zufahrten zu den Seehäfen und Werften), zur Nutzung der Meeresenergie (Gezeitenkraftwerke, vgl. 2.1.4.) und zur Neulandgewinnung.
Die Bauten an der Küste stehen unter der Einwirkung von Wind, Wellen, Küstenströmung und Gezeiten. An den *Gezeitenküsten* steigt und fällt der Meeresspiegel im periodischen Wechsel zwischen Ebbe und Flut. Der Tidenhub erreicht max. 21 m (Fundy-Bay, Neufundland). Die in nautischen Karten eingetragenen Tiefenlinien beziehen sich auf Seekartennull (SKN), was dem mittleren Springtidenniedrigwasser (M Sp Tnw) entspricht.
Zu den gezeitenlosen Küsten gehören die Küsten der Binnenseen und Binnenmeere (Ostsee, Mittelmeer). Hier schwankt der Wasserstand nur wenig. Die Bauhöhen werden auf Mittelwasser (MW) bezogen.
Küstenschutzwerke. *Dünen.* Zum Schutze der Kulturflächen wird die Dünenbildung durch Anlegen von *Sandfangezäunen* gefördert. Um das Fortschreiten der Wanderdüne, das ≈ 4 bis 5 m im Jahr beträgt, zu verhindern, werden die Dünen durch *Bestecks* geschützt, d. h. ≈ 30 cm hohe Zweige reihenförmig in den Sand gesteckt und so quadratische Felder von 2 bis 4 m Seitenlänge geschaffen, die man dann mit Strandhafer bepflanzt.
Deckwerke und *Steinwälle* schützen die Ufer gegen Abbruch durch Welleneinwirkung. Liegende Deckwerke erhalten eine Böschungsneigung von 1:2 bis 1:3 und werden durch eine dicke Steinpflaster- oder Betondecke bzw. in bituminöser Bauweise abgedeckt. Stehende Deckwerke (Ufermauern) haben meist eine konkave Auflauffläche, die die Meereswelle aus der waagerechten in die senkrechte Richtung umlenkt. Anstelle von Ufermauern hat man an der Ostsee mit gutem Erfolg Steinwälle aus großen, bis zu 4 t schweren, lose gepackten Steinen errichtet. Sie werden auf einer Unterlage aus Faschinen oder Textilfiltern gegründet, um sie gegen Unterspülen zu sichern.
Seebuhnen. Strandbuhnen werden zum Schutz gegen Strandvertriftung senkrecht zum Strand angelegt. Die Buhnen sind in der Ostsee 30 bis 60 m, in der Nordsee 50 bis 200 m lang. Sie werden aus Packwerk, Pfählen, großformatigen Steinen, Betonfertigteilen oder Sandsäcken gebaut.
Wellenbrecher sind der Küste parallel vorgelagert und fördern die Sandanlagerung. Sie werden als Steinschüttungen oder massive Bauwerke errichtet. Die Kombination von Wellenbrecher und Buhne ergibt die *T-Buhne.*
Seedeiche werden zum Schutz des Hinterlands vor Hochwasser und Sturmfluten angelegt. Vor dem Deichfuß soll ein 100 bis 250 m breiter Vorlandstreifen liegen, damit die Energie der Wellen gebrochen wird. Das Deichinnere besteht aus Sand und Kies. Die Höhe der Deichkrone ergibt sich aus der Höhe des höchsten Springtidenhochwassers, der Windstauhöhe und dem Wellenauflauf.
Seehafenbau. Häfen können in Strommündungen (*Stromhäfen*), in Buchten oder an der freien Küste liegen. *Offene Seehäfen* haben eine freie Verbindung mit dem Meer. *Geschlossene Seehäfen* sind durch ein Einzeltor (*Dockhafen*) oder durch eine Schiffsschleuse (*Schleusenhafen*) gegen die offene See abgeschlossen; sie werden angelegt, wenn die Meeresspiegelschwankungen infolge der Gezeiten 3 m übersteigen.
Häfen an der freien Küste werden vor den Einwirkungen der Wellen durch *Hafenaußenwerke*, wie Molen und Wellenbrecher, geschützt. Diese können als freistehende Mauern, als Steindämme oder als Steindämme mit aufgesetzter Mauer ausgeführt werden. Die Böschungen der aus Geröllmassen hergestellten Dämme werden mit großen Steinblöcken oder *Tetrapoden* (vierfüßige Stahlbetonkörper, 25 bis 40 t schwer) abgedeckt. *Molen* sind von der Küste aus begehbar und zum Anlegen von Schiffen geeignet, *Wellenbrecher* dagegen nicht.
Stromhäfen erfordern meist einen mehr oder weniger langen *Zufahrtskanal* (*Seekanal*, *Fahrrinne*; z. B. zum Überseehafen Rostock 5,7 km lang, 80 bis 200 m breit, 13 m tief). Außerdem ist die Strommündung – besonders an einer Flachküste – vor Versandung zu schützen.
Hafenbecken sind etwa fünfmal so lang und vier- bis sechsmal so breit wie die verkehrenden Schiffe; damit ergeben sich Längen bis zu 1 500 m und Breiten bis zu 200 m. Die Ufereinfassungen (Kais) begrenzen die Hafenbecken und ermöglichen das Anlegen und Festmachen der Schiffe.

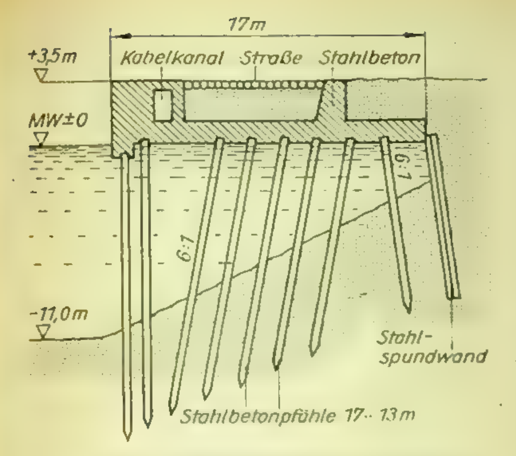


Abb. 15.10.7-1 Stahlbetonplatte auf Pfahlrost

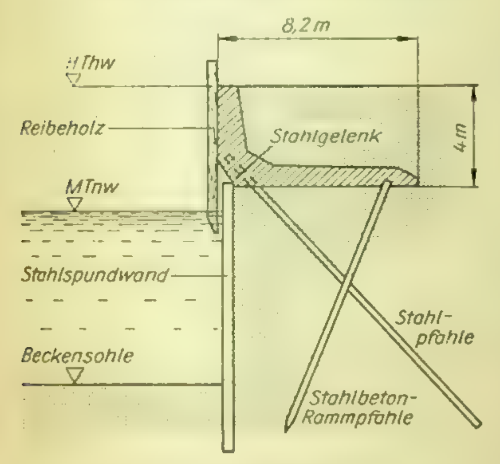


Abb. 15.10.7-2 Winkelstützmauer

Für moderne Anlagen mit großer Höhe verwendet man vorwiegend hochliegende elastische *Stahlbetonplatten* auf *Pfahlrost* mit hinterer Abschlußspundwand (Abb. 15.10.7-1), *Winkelstützmauern* auf hohem Pfahlrost mit vorderer Abschlußspundwand (Abb. 15.10.7-2) oder Stahlspundwände. Zum Schutz der Schiffe und Kaikonstruktionen vor Beschädigungen beim Anlegen werden auf der Wasserseite *Reibehölzer* und *Fender* (große federnde Kissen) angebracht. Zum Festmachen dienen *Poller* auf den Kais sowie *Dalben* innerhalb der Hafenbecken.

Ölhäfen erfordern kein senkrechtes Ufer. Es genügt eine *Anlegebrücke*, die *Pier*, die die erforderlichen Rohrleitungen trägt. Sie ist entweder ein *Anlegesteg*, wie im Überseehafen Rostock, oder sie besteht aus Zufahrts- und Löschbrücke. Die *Zufahrtsbrücke* reicht vom Ufer bis zu der Stelle, wo die für das Anlegen des Tankers erforderliche Wassertiefe von ≈ 15 m vorhanden ist. Die *Löschbrücke* liegt meist senkrecht zur Zufahrtsbrücke an deren Kopf. Ölhäfen für Tanker mit sehr großem Tiefgang weisen z. T. in großem Abstand vom Ufer eine mit diesem durch Rohrleitungen verbundene *Anlegeinsel* auf.

Seekanäle dienen der Verbindung von Häfen mit der See, z. B. Seekanal zum Überseehafen Rostock, oder zweier Meere bzw. Meeresteile, z. B. Suezkanal. Querschnittsgröße und -form richten sich nach den Schiffsgrößen. Die Wassertiefe muß mindestens 1 m größer sein als der Tiefgang der tiefstgehenden Schiffe (Tab. 15.10.7-3).

Tab. 15.10.7-3 *Erforderliche Abmessungen für Seekanäle*

Tragfähigkeit des Regelschiffes in t	Tiefe in m	Sohlenbreite in m	Wasserspiegelbreite in m
11000	9,00	60... 80	120...140
21000	10,50	80...100	140...160
65000	14,00	100...130	190...230
100000	16,00	130...160	220...250

15.10.8. Wehrbau

Wehre sind feste oder mit beweglichen Verschlüssen versehene, quer zur Fließrichtung des Wassers angelegte Bauten im Flußbett. Durch Anstauen des Wassers wird der Grundwasserstand beeinflußt, die Wassertiefe für die Schiffahrt vergrößert, das Flußgefälle für die Nutzung der Wasserenergie an der Wehrstelle zusammengefaßt und die Ableitung des Wassers für Bewässerung und industrielle Nutzung ermöglicht.

Feste Wehre bestehen aus dem *Wehrkörper* mit der Wehrkrone und dem Abfallrücken. Dieser geht in das *Tosbecken* (Sturzbett) über, das die Bildung einer Wasserwalze mit waagerechter Achse (Deckwalze) fördert, wodurch ein Teil der Bewegungsenergie des herabstürzenden bzw. -schießenden Wasserstrahls in unschädliche Wärmeenergie umgewandelt wird.

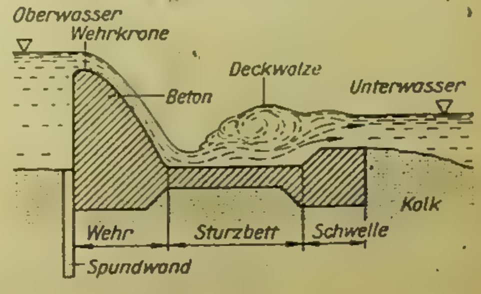


Abb. 15.10.8-1 Schußwehr

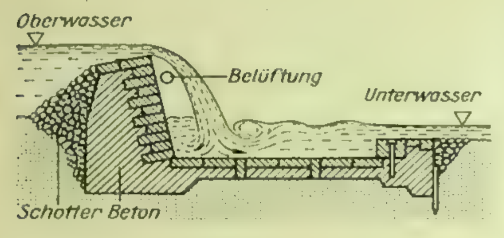


Abb. 15.10.8-2 Sturzwehr

Feste Wehre werden als *Überfall-* oder *Grundwehr* bezeichnet, je nachdem, ob der Unterwasserspiegel unter oder über der Wehrkrone liegt. Das Überfallwehr kann *Schußwehr* (Abb. 15.10.8-1) oder *Sturzwehr* sein (Abb. 15.10.8-2).
Zur Verhinderung der Unterspülung bei durchlässigem Untergrund wird auf der Oberwasserseite des Wehrs (vgl. Abb. 15.10.8-1) eine Spundwand, ein Dichtungsschleier, eine Dichtungsschürze oder ein Dichtungsteppich angeordnet (vgl. 15.10.9.).
Wehre mit beweglichen Verschlüssen dienen zur Regulierung des Oberwasserstands und zur ungehinderten Ableitung des Hochwassers. Sie sind meist durch Wehrpfeiler in einzelne Wehrfelder (lichte Weiten bis über 50 m) unterteilt.
Hubverschlüsse bei Walzen-, Segment- und Schützenwehren erleichtern die Geschiebeabfuhr. *Senkverschlüsse* bei Klappen-, Dach- und Sektorwehren ermöglichen das Abführen von Eisschollen und Schwimmstoffen.

15.10.9. Talsperrenbau

Talsperren sind feste Stauanlagen, die über den Querschnitt eines Flußlaufs hinaus dessen Tal in ganzer Breite abschließen und einen Stauraum schaffen, der dauernd oder zeitweise als Speicher verwendet wird. Sie können der Trinkwasserversorgung oder Betriebswasserversorgung, der Niedrigwasseraufhöhung zum Verbessern der Schiffahrtsverhältnisse, der Speisung von Schiffahrtskanälen, der Energieerzeugung, der landwirtschaftlichen Bewässerung und dem Hochwasserschutz dienen (Tafel 59). *Hochwasserrückhaltebecken* dienen nur dem Hochwasserschutz; sie liegen die übrige Zeit trocken. Eine Talsperre besteht aus dem *Abschlußbauwerk* (Staumauer oder -damm), den *Betriebsanlagen* (Hochwasserentlastungsanlage, Grundablaß, Wasserentnahme) und den *Nebenanlagen* (Vorsperren, Gegensperren mit Ausgleichsbecken, Stollen u. a.).
Staumauern werden je nach den Untergrundverhältnissen und der Talform mit dem in Klammern angegebenen Schlankheitsgrad (Sohlenbreite:Mauerhöhe) als Gewichtsstaumauer (0,7 bis 0,8), Bogengewichtsstaumauer (0,4 bis 0,65), Bogenstaumauer (0,15 bis 0,35) oder Pfeilerstaumauer ausgebildet.
Gewichtsstaumauern (G) haben einen angenähert dreieckigen Querschnitt mit lotrechter Wasserseite (Tafel 59). Sie werden im Grundriß geradlinig oder schwach gekrümmt ausgeführt. Um Spannungen im Beton infolge von Temperatureinflüssen und Schwinden zu vermeiden, werden vertikale Dehnungsfugen angeordnet. Eingedrungenes Sickerwasser wird Kontrollschächten bzw. -gängen zugeleitet. In diesen Gängen befinden sich außerdem zahlreiche Meßeinrichtungen zur Überwachung der Mauer.
Bei *vorgespannten Gewichtsstaumauern* (Abb. 15.10.9-1) wird ein Teil der Betonmasse durch eine in die Betonmauer eingetragene Druckvorspannung ersetzt, die man durch im Baugrund verankerte, bis zur Mauerkrone reichende Spannstähle (Felsanker) erzeugt.
Bogengewichtsmauern (BG) haben ebenfalls einen dreieckigen Querschnitt, der Grundriß ist aber bogenförmig. Durch die Bogenwirkung wird ein Teil der Wasserlast auf die Talhänge übertragen.
Bogenstaumauern (B; Abb. 15.10.9-2) wendet man an, wenn die Talbreite kleiner als ein Fünftel der Mauerhöhe ist; sie haben ebenfalls bogenförmigen Grundriß. Die Wasserlast wird vorwiegend in waagerechter Richtung in die Felshänge übertragen.
Pfeilerstaumauern – vorteilhaft besonders in breiten Tälern – weisen mehrere Pfeiler auf, gegen die sich die Stauwand abstützt. Nach der Form der Stauwand unterscheidet man *Pfeilerplatten-*, *Pfeilergewölbe-*, *Pfeilerkuppel-* und *Pfeilerkopfstaumauern*.

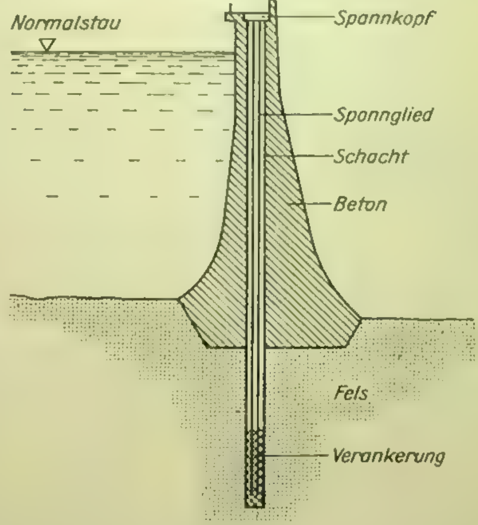


Abb. 15.10.9-1 Vorgespannte Gewichtsstaumauer

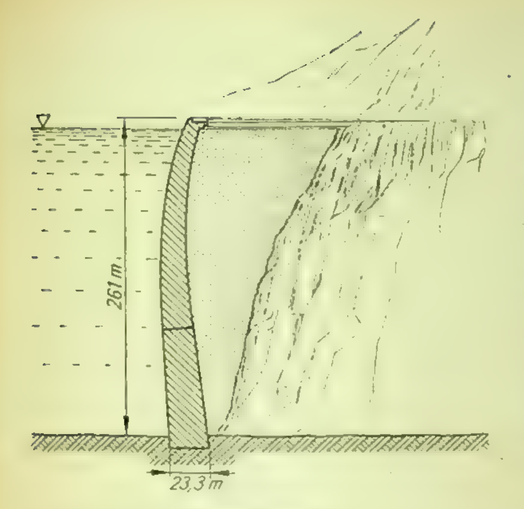


Abb. 15.10.9-2 Bogenstaumauer (Vajont/Italien)

Staudämme stellen geringere Anforderungen an den Baugrund als Staumauern; sie werden als Erd- oder Steindämme ausgeführt.
Erdstaudämme (ED) werden entweder aus einheitlichem Erdstoff oder aus verschiedenartigen Erdstoffen, wie Lehm, Sand, Kies, Geröll, errichtet. Die Dichtung kann als wasserseitige Außendichtung mit Asphalt, Beton, Stahlbeton u. a. oder als wasserseitige bzw. zentrale Innendichtung mit Lehm, Ton, Tonbeton, Beton, Stahlbeton u. a. ausgebildet werden. Die Krone der Erddämme soll mindestens 3 m breit sein und, da der Damm nicht überströmt werden darf, mindestens 2 m über dem höchsten Wasserspiegel liegen.
Steindämme (SD; Abb. 15.10.9-3) bestehen aus geschütteten Steinen (*Steinschüttdamm*) oder aus einzeln versetzten Steinen (*Steinsetzdamm*) und haben eine Außen- (Tafel 59) oder Innendichtung. Für die Steinschüttung wird Felsbruchmaterial verwendet, das mittels Vibratoren oder Stampfplatten verdichtet wird. Die Außendichtung kann aus einer monolithischen Betondecke, aus Betonplatten, Asphaltbeton oder aus Polyäthylenfolien bestehen (Tab. 15.10.9-4 und 5).
Untergrundabdichtung. Zum Vermindern der Sickerverluste und zum Gewährleisten der Standsicherheit des Staubauwerks wird der Untergrund entsprechend örtlicher Gegebenheiten abgedichtet. Der bis zu 60 m tiefe vertikale *Dichtungsschleier* wird durch Injektion von Zementmilch, Zementmörtel, einer Speziallösung oder Bitumenemulsion hergestellt. Die vertikale *Dichtungswand* (*Schlitzwand*) ist ein 0,60 bis 1,00 m breiter und bis zu 60 m tiefer, ausgebaggerter, mit Ton, künstlich aufbereitetem Erdstoff oder Beton ausgefüllter Schlitz. Der der Sperre im Stauraum vorgelagerte *Dichtungsteppich* be-

Tab. 15.10.9-4 *Bedeutende Talsperren der DDR*

Bezeichnung	Einzugsgebiet	Höhe in m	Stauraum in Mio. m³	Bauart[1]
Rappbode	Bode/Saale	106	108,5	G
Bleiloch	Saale	76	215	BG
Hohenwarte	Saale	75	182	BG
Schönbrunn	Schleuse/Werra	66	22,5	SD
Saidenbach	Flöha	59	22,4	BG
Pöhl	Trieb/Weiße Elster	57	62,4	BG
Ohra	Unstrut	55	19	SD
Gottleuba	Gottleuba/Elbe	52	13	G
Lehnmühle	Wilde Weißeritz	50	21,8	G
Lichtenberg	Freiberger Mulde	48	15,5	SD
Rauschenbach	Flöha	47	15	G
Klingenberg	Wilde Weißeritz	40	16,4	G
Spremberg	Spree	12	42,7	ED

[1] Erklärung siehe Tab. 15.10.9-5

Abb. 15.10.9-3 Schnitt durch den Assuan-Hochdamm (Steinschüttdamm)

steht aus einer horizontal liegenden Ton-, Lehm-, Tonbeton- oder Asphaltbetonschicht, die mit einer Sandschicht abgedeckt ist.

Hochwasserentlastungsanlagen und Grundablässe. Die einem bereits gefüllten Talsperrenbecken zufließenden Hochwassermassen müssen über eine Hochwasserentlastungsanlage (Kronenüberfall, Heber, Schachtüberfall, Hangüberfall, Schußrinne, Sprungschanze; Abb. 15.10.9-6) schadlos abgeleitet werden können. Grundablässe sind Rohrleitungen, die die vollständige Entleerung des Staubeckens sowie die ständige Abgabe einer geforderten Mindestwassermenge in das unterhalb liegende Bach- oder Flußbett ermöglichen. Hierzu enthalten sie Verschluß- und Regulierschieber. Der Durchmesser der Grundablässe beträgt bei mittelgroßen Talsperren 0,8 bis 4,5 m.

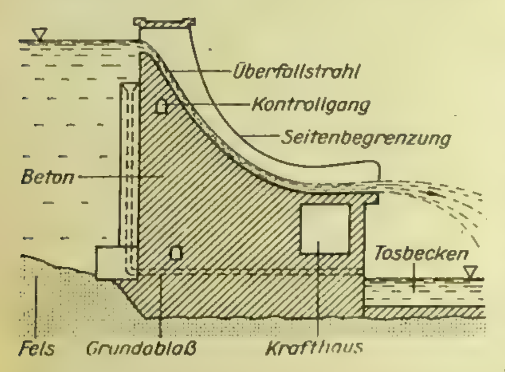


Abb. 15.10.9-6 *Sprungschanzenüberfall*

15.10.10. Wasserkraftanlagen

Eine Wasserkraftanlage dient der Gewinnung elektrischer Energie. Sie besteht aus der *Stauanlage* (Wehr oder Talsperre), den Triebwasserleitungen und dem *Kraftwerk* mit den Wasserturbinen und Generatoren (vgl. 2.1.4.).

15.11. Straßenbau

15.11.1. Zweckbestimmung

Straßen sind *Landverkehrswege*, die der flächenhaften Erschließung des Territoriums und der Siedlungen dienen.

Nach dem Benutzungsrecht unterscheidet man *öffentliche Straßen*, die für jedermann zur Benutzung zugelassen sind (z. B. Landstraßen, Stadtstraßen, Autobahnen) und *betrieblich-öffentliche Straßen*, deren Benutzung jederzeit völlig untersagt oder auf bestimmte Verkehrsteilnehmer beschränkt werden kann (z. B.

Tab. 15.10.9-5 *Bedeutende Talsperren der Welt*

Bezeichnung	Einzugsgebiet	Land	Höhe in m	Stauraum in Mio. m³	Bauart[1]
Staumauern					
Inguri	Inguri	UdSSR/Georg. SSR	301	1 550	B
Grande-Dixence	Dixence/Rhône	Schweiz	284	400	G
Vajont	Vajont/Piave	Italien	261	600	B
Mauvoisin	Drance de Bagnes/Rhône	Schweiz	237	180	B
Tschirkey	Sulak/Kasp. Meer	UdSSR/Kaukasus	233	2 780	B
Bhakra	Suthley/Indus	Indien	225	9 868	G
Boulder (Hoover)	Colorado	USA/Nevada	221	38 296	BG
Toktogul	Naryn/Syr Darja	UdSSR/Kirgis. SSR	215	19 500	B
Daniel Johnson Dam	Manicouagan/ Sankt-Lorenz-Strom	Kanada/Quebec	214	141 975	GRP
Staudämme					
Nurek	Wachsch/Amu Darja	UdSSR/Tadshik. SSR	310	10 500	SD
Mica	Columbia	Kanada/Brit. Columbia	244	24 691	SD
Oroville	Feather/Sacramento	USA/Cal.	235	4 330	ED
Keban	Firat/Euphrat	Türkei	207	31 000	SD
New Melones	Stanislaus	USA/Cal.	185	2 960	SD
W. A. C. Benett	Peace/Mackenzie	Kanada/Brit. Columbia	183	70 100	ED
New Don Pedro	Tuolumne	USA/Cal.	177	2 504	SD
Tscharwak	Tschirtschik	UdSSR/Usbek. SSR	168	2 006	SD
Trinity	Trinity/Columbia	USA/Cal.	164	3 084	ED
Gepatsch	Fuggenbach/Inn	Österreich	153	140	SD
Akosombo	Volta	Ghana	113	148 000	SD
Assuan-Hochdamm	Nil	Ägypten	111	157 000	SD

[1] B = Bogenstaumauer, G = Gewichtsstaumauer, BG = Bogengewichtsstaumauer, ED = Erddamm, SD = Steindamm, GRP = Gewölbreihen-Pfeilermauer

Werkstraßen, Straßen der Land- und Forstwirtschaft).
Öffentliche Straßen werden in Abhängigkeit von der Bedeutung u. a. in verkehrlicher Hinsicht und der administrativen Zuordnung unterschieden in:
Landstraßen, die zunächst dem Verkehr zwischen den Siedlungen dienen und die darüber hinaus im nationalen Rahmen Wirtschafts- und Verwaltungszentren miteinander verbinden, die aber z. T. auch im internationalen Rahmen bestimmte Verkehrsaufgaben übernehmen müssen (Staatsstraßen, Bezirksstraßen);
Stadtstraßen, die der Erschließung innerhalb der Siedlungen dienen und dabei als Hauptverkehrs-, Verkehrs-, Sammel- und Wohnstraßen unterschiedliche Verkehrsaufgaben zu übernehmen haben;
Autobahnen, die nur dem schnellen motorisierten Straßenverkehr vorbehalten sind, und zwar als Sonderform sowohl im übergeordneten Landstraßennetz als auch im Bereich der Stadtstraßen (Stadtautobahnen).
Oberstes Gebot für die Gestaltung der Straßen und ihrer Nebenanlagen ist eine höchstmögliche *Verkehrssicherheit*. Die Gestaltung muß sowohl in funktionell-technischer als auch konstruktiv-technischer Hinsicht so erfolgen, daß ein sicherer und zugleich möglichst rascher Verkehrsablauf gewährleistet wird. Dafür sind ästhetische und verkehrspsychologische Gesichtspunkte in gleichem Maße wichtig, wie z. B. die Fragen der Oberflächenbeschaffenheit und Tragfähigkeit der Straßen.

15.11.2. Funktionell-technische Gestaltung

Linienführung. Eine Straße muß so verlaufen, daß sie in verkehrspsychologischer, fahrdynamischer, bautechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht eine optimale Lösung darstellt. Unter Linienführung versteht man die Festlegung des Verlaufs einer Straße nach Richtung und Neigung und damit die geometrische Gestaltung ihrer Achse im Grund- und Aufriß sowie ihres Querschnitts.

Grundlage zur Ermittlung der Entwurfselemente für die Gestaltung einer Straße ist die Entwurfsgeschwindigkeit, die in Abhängigkeit von der Geländeform, Verkehrsbedeutung und -belegung sowie von volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten festgelegt wird. Von ihrer Größe wiederum ist die Größe der Entwurfselemente (u. a. Krümmungsradius, Längs- und Querneigung, Ausrundungsradien für die Gefällewechsel, Sichtweite) abhängig (Tab. 15.11.2-1).
Im *Grundriß* besteht die Trasse (Bezeichnung für die Linie einer Straße) aus *Geraden*, *Kreisbogen* und zwischengeschalteten *Übergangsbogen*. Die moderne Linienführung strebt für den Verlauf einer Straße ein *Schwingen ihrer Trasse* an. Durch eine Folge von Kreisbogen mit großem Radius und wenigen, kurzen Geraden soll die Straße so gestaltet werden, daß sie sich sowohl gut in die Landschaft einfügt als auch zügig und sicher (z. B. ohne Blendwirkung durch den Gegenverkehr) befahren werden kann. Als Übergangsbogen wurde die *Klotoide* gewählt, da diese mathematische Kurve aufgrund ihrer Funktionsgleichung eine stetige Veränderung der Krümmung von der Geraden zum Kreisbogen gestattet und damit die fahrdynamisch günstigste Lösung darstellt.
Die Trassierung im Grundriß geschieht i. allg. anhand eines Lageplans, der neben den zu berücksichtigenden Zwangspunkten (vorhandene Verkehrswege, Gewässer, Hochbauten u. a.) Höhenschichtlinien enthalten muß. Bei besonderen Teilen des Straßennetzes (z. B. Autobahnen) kann die Linienführung auch aufgrund von Luftbildern erfolgen.
Im *Aufriß* muß die Gestaltung vorrangig nach Gesichtspunkten der Verkehrssicherheit, Durchlaßfähigkeit und Baukosten vorgenommen werden. Deshalb wird zunächst versucht, die Trasse dem Verlauf der Geländeoberfläche anzupassen, um die Erdarbeiten (Herstellen von Einschnitten und Dämmen) und damit die Baukosten auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu bringen. Anderseits hat die Größe der Längsneigungen

Ab. 15.11.2-1 *Ausgewählte Richtwerte einiger Entwurfselemente für Landstraßen*

Entwurfsgeschwindigkeit	30	40	50	60	70	80	90	100	Maßeinheit km/h
Krümmungsradius minimal	60	100	175	250	325	400	525	650	m
Klotoidenparameter minimal	40	60	90	120	150	180	210	250	m
Längsneigung maximal	10	8	7	6	5	4	3,5	3	%
Schrägneigung maximal	12,5	11	10	9	8	7,5	7	6,5	%
Begegnungssichtweite	70	100	120	150	185	230	280	340	m
Überholsichtweite	250	250	250	300	375	450	550	600	m
Länge der Geraden maximal	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	m
Länge der Geraden minimal	60	80	100	120	140	160	180	200	m

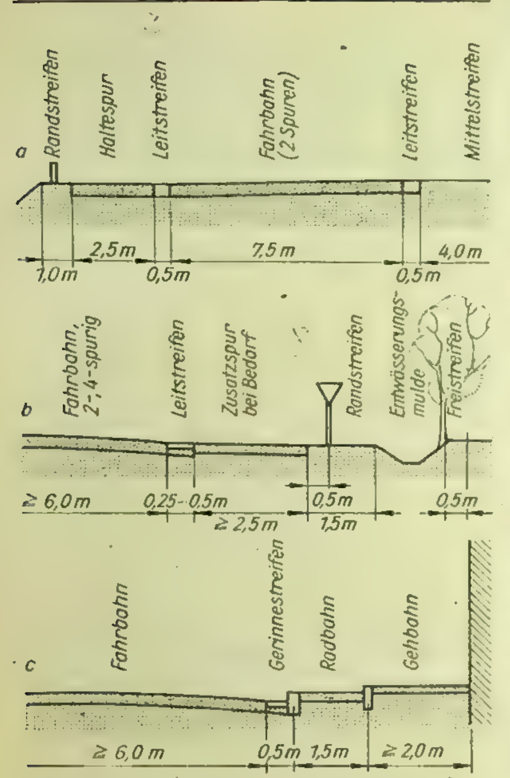


Abb. 15.11.2-2 Querschnitte a einer Autobahn, b einer Landstraße und c einer Stadtstraße

einen großen Einfluß auf die Durchlaßfähigkeit, was sich vor allem bei Steigungsstrecken durch eine Herabsetzung der Verkehrsgeschwindigkeit von LKW und in einer Behinderung des Verkehrsflusses aller schnelleren Fahrzeuge bemerkbar macht. Daneben ist aber nicht außer acht zu lassen, daß sich Steigungsstrecken auch wirtschaftlich ungünstig auswirken, indem die Fahrzeit verlängert und der Kraftstoffverbrauch erhöht wird. Schließlich muß aus Gründen der Verkehrssicherheit an die Ausbildung der Neigungswechsel die Forderung nach Ausrundung mit großem Radius gestellt werden, um das Fahrverhalten der Fahrzeuge und die Sichtverhältnisse für den Verkehrsteilnehmer so günstig wie möglich zu gestalten.

Infolge der bei der Fahrt durch eine Krümmung auftretenden Kräftewirkungen ist im Bereich eines solchen Trassenabschnitts eine Querneigung der Fahrbahn erforderlich. Dabei besteht eine direkte Beziehung zwischen der Entwurfsgeschwindigkeit, dem Radius des Kreisbogens und der notwendigen Querneigung. Die Größe der Querneigung liegt zwischen 1,5 % (Mindestwert aus Gründen der Fahrbahnentwässerung) und 6 % (Maximalwert aus Gründen der Verkehrssicherheit bei ungünstigen Witterungsverhältnissen).

Sicherheit, Durchlaßfähigkeit und Flüssigkeit des Verkehrs hängen davon ab, welche *Sichtweite* dem Verkehrsteilnehmer zur Verfügung steht. Je länger der Straßenabschnitt ist, den er vor sich einsehen kann, um so sicherer kann er sich besonderen Fahrbahn- und Verkehrsbedingungen anpassen.

Querschnittsgestaltung. Verkehrstechnische Forderungen sowie bautechnische und wirtschaftliche Aspekte beeinflussen die Querschnittsgestaltung. Zum Querschnitt (Abb. 15.11.2-2) gehören die *Verkehrsspuren* (das sind die Fahrbahnen mit ihren Fahrspuren sowie die Zusatzspuren in Form der Halte-, Park-, Kriech- sowie der Aus- und Einfädelungsspur bei Knotenpunkten), ferner die *befestigten* und *unbefestigten Streifen* (Leit-, Gerinne-, Seiten-, Rand-, Frei- und Trennstreifen, Gräben und Böschungen) sowie vor allem bei Stadtstraßen durch Hochbord von der Fahrbahn getrennte *Seitenbahnen* als Verkehrsflächen für Fußgänger (Gehbahn) und Radfahrer (Radbahn). Bei der Querschnittsgestaltung von Stadtstraßen ist gegebenenfalls die Straßenbahn zu berücksichtigen, entweder durch die Anordnung der Gleise innerhalb der Fahrbahn (platzsparend, meist aber verkehrsbehindernd) oder durch die Anweisung eines besonderen Straßenbahngleiskörpers (klare Vekehrsverhältnisse, jedoch zusätzliche Breite von ≈ 9 m) in Mittellage zwischen 2 Fahrbahnen oder in Seitenlage.

Die Breite der Verkehrsspuren ist abhängig von der Entwurfsgeschwindigkeit und der Bedeutung der Spur. Die Breite der Fahrspur schwankt zwischen 3,0 und 3,75 m, die Breite der Halte- und Parkspur beträgt 2,5 m, die der Radspur 1,5 m. Eine Gehbahn soll mindestens 2,0 m breit sein.

Fahrbahnen haben mindestens 2 Verkehrsspuren (in der Regel 2 Fahrspuren) und damit eine Breite von 6,0 m. Bei Wohnstraßen kann die Breite auf 5,5 m reduziert werden, was der Breite einer Fahrspur und einer Halte- bzw. Parkspur entspricht. Richtungsfahrbahnen haben in der Regel 2 Fahrspuren, dazu bei Autobahnen eine Haltespur. Die Verkehrsbelegung kann aber auch 3 oder 4 Fahrspuren in einer Richtung erforderlich machen.

Der *Leitstreifen* dient neben dem Schutz bzw. der Einfassung der Fahrbahn der optischen Führung des Verkehrs. Der unbefestigte *Randstreifen* begrenzt den Verkehrsraum gegen die Böschung, Gräben und angrenzendes Gelände. Er nimmt die vertikalen Leiteinrichtungen auf. *Trennstreifen* werden zur räumlichen Trennung zwischen den verschiedenen Bahnen angelegt, und zwar nach Möglichkeit als Grünstreifen. Die häufigste Form ist die des Mittelstreifens zwischen den Richtungsfahrbahnen der Autobahn. *Freistreifen* schützen eine Straße vor Beschädigungen durch Anlieger.

Lichtraumprofile geben Breite und Höhe an, die zum ordnungsgemäßen Verkehrsablauf erforderlich sind. Die Breite richtet sich nach der Anzahl der Spuren im Straßenquerschnitt. Die Mindesthöhe beträgt bei Fahrbahnen 4,5 m, bei Rad- und Gehbahnen 2,5 m.

Knotenpunkte liegen bei einer Zusammenführung mehrerer Straßen vor. Es handelt sich dabei im Prinzip um Einmündungen, Abzweigungen und Kreuzungen. Aus Gründen der Verkehrssicherheit muß die Gestaltung der Knotenpunkte so erfolgen, daß sie übersichtlich sind, die Verkehrsführung klar erkennbar ist, daß die einzelnen Elemente fahrdynamisch richtig ausgebildet sind und daß die Durchlaßfähigkeit ausreichend groß ist.

Zu den *Knotenpunktelementen* gehören zunächst die Knotenpunktzufahrten, in denen die *Sortierungsstrecken* für die Einordnung der Fahrzeuge nach Verkehrsrichtungen (je nach Verkehrsbelegung zwei- oder mehrspurig) mit dem anschließenden *Stauraum* für die während einer Sperrzeit ankommenden Fahrzeuge angeordnet sind. Dabei werden die einzelnen Fahrtrichtungen durch Fahrbahnmarkierungen und in Sonderfällen durch Trennstreifen oder Fahrbahnteiler (Inseln mit Hochbord) gekennzeichnet. Straßen mit hoher Vekehrsbelegung und hohen Verkehrsgeschwindigkeiten erfordern im Interesse eines ungestörten Verkehrsablaufs Verzögerungs- und Beschleunigungsspuren (vorrangig bei Autobahnanschlußstellen).

Bei den Knotenpunkten unterscheidet man *niveaugleiche*, die in einer Ebene liegen, und *niveaufreie*, bei denen der Verkehr in 2 oder mehr ebenen Ebenen abgewickelt wird.

Zubehör. Als Zubehör gelten alle baulichen Einrichtungen, die der Verkehrsorganisation dienen, zum verkehrsgerechten Verhalten der Verkehrsteilnehmer beitragen und die notwendige Orientierung geben.

Die *Verkehrszeichen* sind durch die Straßenverkehrsordnung in Form von Warn-, Vorschrift-, Hinweis- und Zusatzzeichen festgelegt.

Verkehrsleiteinrichtungen leiten nicht nur den Straßenverkehr, sie tragen auch zu einem sicheren und geordneten Verkehrsablauf bei und erlauben eine rationelle Ausnutzung der Verkehrsfläche.

Fahrbahnmarkierungen sind waagerechte Leiteinrichtungen, für deren Gestaltung Farbe oder Plastbaustoffe eingesetzt werden. Sie werden durch *senkrechte Leiteinrichtungen* unterstützt und ergänzt, da diese den Straßenverlauf und die Begrenzung des Verkehrsraums auch bei Dunkelheit, Nebel oder Schnee deutlich kennzeichnen. Dazu gehören Leitpflöcke, -pfosten, -planken, -schraffuren und die Borde in Städten.

15.11.3. Konstruktiv-technische Gestaltung

Die Straßenkonstruktion setzt sich aus den in Abb. 15.11.3-1 dargestellten Schichten zusammen, die entsprechend ihrer Funktion und Beanspruchung konstruktiv gestaltet werden.

Untergrund. Der anstehende Erdstoff bildet den Untergrund einer Straße. Infolge der geringen Dicke der Befestigung wird der Untergrund durch Verkehr und Klima stark beansprucht und muß alle durch den Verkehr in die Befestigung eingetragenen Kräfte aufnehmen. Zugleich ist er aber auch die Schicht, die am stärksten den Einwirkungen des Wassers verschiedener Herkunft (Grund-, Schichten-, versickertes Oberflächenwasser) und des Frostes ausgesetzt ist. Wasserempfindliche Erdstoffe verlieren mit zunehmendem Wassergehalt an Scherfestigkeit, so daß erhebliche Schwankungen der Tragfähigkeit der Straßenkonstruktion auftreten, die zu einer Überbeanspruchung der Befestigung und zu Schäden führen. Bindige Erdstoffe verlieren ihre Tragfähigkeit, wenn die durch Frosteindringung im Untergrund gebildeten Eislinsen tauen und Wasser freisetzen. Durch die Verkehrsbelastung treten dann Tragfähigkeitsschäden auf, die den Verkehrsablauf in erheblichem Umfang beeinträchtigen können.

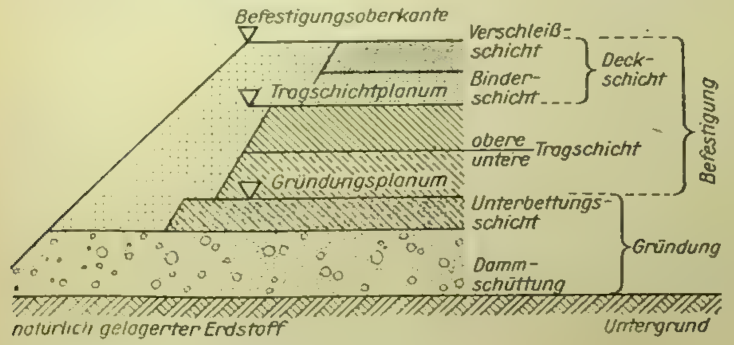


Abb. 15.11.3-1 Konstruktionsschichten im Straßenbau

Gründung. Durch die Veränderung der natürlichen Eigenschaften des anstehenden Erdstoffs oder das Einbringen von fremden Erdstoffen zwischen Untergrund und Befestigung (Dammschüttung) entsteht die Gründung einer Straßenkonstruktion. Sie muß auf ihrer Oberfläche (*Gründungsplanum*) eine Mindesttragfähigkeit aufweisen. In der Regel kann dies nur durch Verdichtung oder Stabilisierung der obersten Schicht des Untergrunds oder der Dammschüttung mit hydraulischen oder bituminösen Bindemitteln erreicht werden. Auf diese *Unterbettungsschicht* werden die einzelnen Schichten der Befestigung aufgebracht.

Befestigung. Die *Tragschicht* ist das tragende Element der Befestigung. Sie muß mit ihrer lastverteilenden Wirkung die Tragfähigkeit gegenüber dem Untergrund erhöhen und die Sicherheit der Befestigung gegenüber Frosteinwirkung gewährleisten. Straßen mit starker Belastung oder mit frostveränderlichen Erdstoffen im Untergrund erfordern eine *untere Tragschicht*, an deren Baustoffe geringere Forderungen gestellt werden als an die der oberen Tragschicht. Die *obere Tragschicht* bildet die Unterlage für die Deckschicht. Sie muß so beschaffen sein, daß sie nur geringe elastische und möglichst keine plastischen Verformungen erfährt. Die *Deckschicht* muß hohen Ansprüchen an Haltbarkeit, Verkehrssicherheit und Fahrkomfort genügen.

Die einzelnen Schichten der Befestigung lassen sich mit verschiedenen Bauweisen ausführen. Bindemittellose, kalk- und bituminös gebundene Konstruktionsschichten sind *flexible Schichten*, d. h. daß sie allmähliche Verformungen darunterliegender Schichten mitmachen können, ohne daß die Schicht zerstört wird. Zementgebundene Schichten werden als *starr* bezeichnet. Sie können dauernde Verformungen nicht aufnehmen, so daß es zum Bruch bzw. zu Rissen kommt.

Entwässerung. Oberflächenwasser verschiedenen Ursprungs muß durch eine ausreichende Querneigung der Verkehrsspuren, der befestigten und unbefestigten Streifen rasch abgeleitet werden, damit keine Schäden an der Straßenanlage entstehen, das Wasser nicht in die Straßenkonstruktion eindringen kann und die Verkehrssicherheit gewährleistet bleibt. Entwässerungsanlagen an der Straße dürfen die Verkehrsteilnehmer sowenig wie möglich gefährden. Das Oberflächenwasser wird bei Landstraßen meist in offenen Sammlern (Mulde, Graben, Gerinne) und nur bei schwierigen Geländeverhältnissen und Mittelstreifen sowie bei Stadtstraßen in verdeckten Sammlern (Rohrleitung) abgeführt.

Auch das Gründungsplanum muß entwässert werden. Die Sammlung und Abführung des Tiefenwassers verhindert, daß sich bei bindigen und frostveränderlichen Erdstoffen Wasser ansammelt und dadurch die Tragfähigkeit des Untergrunds oder der Gründung herabgesetzt wird. Das Wasser wird über Sickerschichten (flächenhaft) oder Dränagerohre in Sammelanlagen außerhalb der befestigten Straßenfläche abgeführt.

15.11.4. Bautechnische Gestaltung

Bemessung. Für 6 Belastungsklassen (0 = Geh- und Radbahnen, 1 = sehr leichter, 2 = leichter, 3 = mittlerer, 4 = schwerer, 5 = sehr schwerer Verkehr) bestehen vereinheitlichte Befestigungen (Abb. 15.11.4-1). Darin werden die Zuordnung und Art der Konstruktionsschichten für Deck- und obere Tragschichten, die Schichtdikken und die Auswahl der vorzugsweise anzuwendenden Befestigungen festgelegt. Die Dicke der unteren Tragschicht muß nach den örtlichen Bedingungen, z. B. anstehender Erdstoff, hydrologische Verhältnisse im Untergrund, bemessen werden.

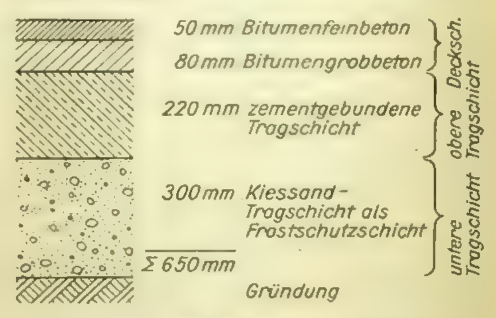


Abb. 15.11.4-1 Befestigung einer Straße der Belastungsklasse 4

Baustoffe. Hierzu zählen Zuschlagstoffe, Füllstoffe sowie hydraulische und bituminöse Bindemittel.

Zuschlagstoffe sind natürliche Lockergesteine in Form von *Sand* (Körnung 0 bis 2 mm), *Kies* (2 bis 32 mm) oder *Kiessand* als Gemenge aus beiden sowie gebrochene Felsgesteine in Form von *Brechsand* (0 bis 2 mm), *Splitt* (2 bis 32 mm) und *Schotter* (32 bis 90 mm).

Füllstoffe sind Steinmehle oder geeignete pulverartige industrielle Abprodukte. Von den *hydraulischen Bindemitteln* werden Portlandzement PZ 3 für den Bau von Deckschichten, PZ 1 und 2, Zemente mit Zumahlstoffen sowie Kalkhydrat für den Bau von Tragschichten eingesetzt. *Bituminöse Bindemittel* sind *Straßenbaubitumen* mit einer Verarbeitungstemperatur von 150 bis 190 °C je nach Viskosität, *Verschnittbitumen* als Gemisch aus Straßenbaubitumen mit niedrig siedenden Verschnittmitteln mit einer Verarbeitungstemperatur von 70 bis 110 °C, *Kaltbitumen* als Gemisch aus Bitumen und Lösungsmitteln

und kaltverarbeitbare *Bitumenemulsion* als in Wasser emulgiertes Bitumen. Weitere Baustoffe sind gebrochene Felsgesteine, wie *Mosaik-*, *Klein-* und *Großpflastersteine*, gebrochene industrielle Abprodukte (u. a. Rückstände des Bergbaus und der Metallurgie), *Betonfertigteile* in Form von Platten unterschiedlicher Größe sowie Bordsteine zur Einfassung der Befestigung. Alle Baustoffe müssen bestimmten technischen Forderungen genügen, die in Beschaffenheitsstandards festgelegt sind.

Tragschichten leiten die Verkehrslasten in die Gründung weiter. Die *untere Tragschicht* besteht aus nicht frostveränderlichen Baustoffen, wie Kiessand, Schotter, die je nach Schichtdicke und vorhandenem Verdichtungsgerät ein- oder zweilagig eingebaut werden. Die *obere Tragschicht* kann aus mehreren Schichten bestehen, so daß Tragschichtkombinationen möglich sind. Für eine *Schottertragschicht* wird Schotter (32 bis 80 mm) 10 bis 20 cm dick mit geeigneten Verteilergeräten eingebaut und mit *Vibrationswalzen* oder schweren *Flächenrüttlern* verdichtet. Nach dem Verdichten sind die Hohlräume durch Einrütteln von Natursand, Brechsand oder Splitt zu verfüllen und die Schicht standfest zu verdichten. Die Tragwirkung wird durch die dichte Lagerung und die Verkeilung der Gesteinskörner und damit durch einen hohen Winkel der inneren Reibung bestimmt.

Tränkmakadam stellt eine 7 bis 8 cm dicke, hohlraumreiche, bituminöse Tragschicht nach dem Makadamprinzip dar, bei der eine standfest gewalzte Schotterschicht mit Bitumen geringer Viskosität von Hand oder mit *Spritzgerät* getränkt, Rohsplitt mit *Splittstreuer* aufgebracht und festgewalzt wird. *Streumakadam* entsteht durch das Anspritzen der Schotterschicht mit einem Bitumen geringer Viskosität und das nachfolgende Einwalzen von bituminiertem Splitt (*Mischsplitt*) in die Hohlräume. Diese Tragschichten erfordern nur einen geringen maschinellen Aufwand. Daher werden sie im untergeordneten Straßennetz noch häufig angewendet. Sie erfordern flexible Deckschichten, da sie zu Setzungen und Nachverdichten unter Verkehr neigen. *Heißgemischte bituminös gebundene Tragschichten* haben den Vorteil, daß die einzubauenden bituminösen Gemische den von der Belastungsklasse abhängigen technischen Forderungen leicht angepaßt werden können. Sande oder Kiessande werden dabei unter Zugabe von Fehlkörnungen (für die Stabilität des Gemischs notwendige, jedoch fehlende Körnungen, wie Füllstoff, Brechsand, Splitt) mit Bitumen mittlerer Viskosität in Aufbereitungsanlagen gemischt und heiß mit Straßenfertigern 5 bis 17 cm dick eingebaut. Nach dem Verdichten mit *Gummirad-* oder *Glattwalzen* und Erkalten des Gemischs ist diese Tragschicht sofort voll befahrbar. Ihre Tragfähigkeit beruht auf der inneren Reibung des Gesteinskorngerüsts und der Kohäsion des Bitumens.

Bituminösgebundene Tragschichten lassen sich auch durch das Einmischen von Bitumenemulsion oder Verschnittbitumen in geeignete anstehende, verbesserte oder besonders eingebrachte Erdstoffe herstellen. Damit wird die Schwerfestigkeit dieser Erdstoffe erhöht und ihre Wasser- und Frostempfindlichkeit verringert. Das Verfahren hat sich jedoch nicht durchgesetzt, da die heißgemischten bituminösen Tragschichten wesentliche technische und technologische Vorteile besitzen. *Zementgebundene Tragschichten* entstehen durch das Einmischen von Zement in nicht- oder schwachbindige Erdstoffe mit nachfolgender Verdichtung bei optimalem Wassergehalt. Dabei gibt es 2 Mischverfahren. Der Zement wird entweder an Ort und Stelle mit geeigneten Geräten, meist Fräsen, in anstehende oder besonders eingebrachte Erdstoffe eingemischt oder beim *Zentralmischverfahren* in Lockergesteine aus Seitenentnahmen, Halden, Gruben oder aus dem Bereich der geplanten Verkehrsfläche in stationären Aufbereitungsanlagen eingemischt. Aus technologischen Gründen wird das zweite Verfahren bevorzugt. Werden aufbereitete Baustoffe nach dem zweiten Verfahren verarbeitet, so wird das entstehende Gemisch als *Magerbeton* bezeichnet. Der Anteil an Zement wird in jedem Falle so bemessen, daß die Druckfestigkeit als Maß der Güte zwischen 5 und 8 N/mm^2 je nach Anforderung liegt. Die geringe Festigkeit der Gemische hat den Vorteil, daß nur Arbeitsfugen erforderlich sind.

Kalkgebundene Tragschichten entstehen durch das Einmischen von Kalk in geeignete bindige Erdstoffe an Ort und Stelle bei einem für die Verdichtung günstigen Wassergehalt.

Als Tragschicht kann schließlich auch eine alte Fahrbahnbefestigung mit genügender Tragfähigkeit verwendet werden.

Bituminöse Deckschichten. Deckschichten unterscheiden sich durch ihren Kornaufbau und damit durch ihren Hohlraumanteil.

Deckschichten nach dem Makadamprinzip sind hohlraumreich. Dabei werden in der Regel gebrochene Gesteinsbaustoffe mit von unten nach oben abnehmender Korngröße eingebaut, wobei durch die Verzahnung und Verspannung der einzelnen Gesteinskörner sowie durch die Klebwirkung des Bindemittels nach dem Verdichten ein standfestes Gesteinsgerüst mit 25 bis 30 % Hohlräumen entsteht. Hohlraumreiche Deckschichten sind 2,5 bis 4,5 cm dicke Schichten aus Mischsplitt, der in einer Aufbereitungsanlage aus Splitt verschiedener Kornklassen und Bitumen oder Verschnittbitumen als Bindemittel hergestellt wird. Das Gemisch wird mit einem Straßenfertiger (Tafel 60) auf der Tragschicht profilgerecht eingebaut und unmittelbar danach mit Gummirad- oder Glattwalzen verdichtet. Der hohe Hohlraumanteil des Mischsplitts bedingt

die Abdichtung der Oberfläche mit einer bituminösen Schutzschicht (s. u.). Mischsplitt weist nur eine geringe Festigkeit und einen geringen Verformungswiderstand auf, so daß damit hergestellte Deckschichten nur für Straßen im untergeordneten Straßennetz (Kreis- und Gemeindestraßen, betrieblich-öffentliche Straßen) zugelassen sind.

Deckschichten nach dem Betonprinzip sind hohlraumarm. Sie bestehen aus Gemischen, bei denen das Gesteinsgemenge (Splitt, Natur-, Brechsand, Füllstoff) nach bestimmten Sieblinienbereichen kornabgestuft zusammengesetzt und deren Bindemittelanteil (Bitumen) nach dem Hohlraum bei dichtester Lagerung des Gesteinsgemenges bemessen wird. Nach dem Einbauen und Verdichten weisen diese Gemische nur noch einen geringen Hohlraumanteil auf.

Hohlraumarme Deckschichten werden aus Bitumenbeton oder Gußasphalt hergestellt. *Bitumenbeton* ist ein Gemisch eines aus Splitt, Natur- und Brechsand sowie Füllstoff bestehenden Gesteinsgemenges mit Bitumen mittlerer Viskosität. Je nach Korngröße des Splitts wird er als Bitumengrobbeton oder -feinbeton bezeichnet. Der Einbau erfolgt einschichtig (BK 0 und 1) oder zweischichtig (BK 2 bis 5), nur in Ausnahmefällen dreischichtig. Bitumenbeton wird in Anlagen aufbereitet, mit Silo- oder abgedeckten Fahrzeugen zur Einbaustelle transportiert, mit Straßenfertigern verteilt und eingebaut (zweckmäßig ist gestaffelter Einbau mit 2 Fertigern über die gesamte Fahrbahnbreite zur Vermeidung einer Mittelnahtbildung) und mit zuerst leichten, dann schweren Walzen verdichtet. Ausreichende Verdichtung bei noch heißem Gemisch ist eine Voraussetzung für eine lange Lebensdauer der Deckschicht.

Gußasphalt enthält im Vergleich zu Bitumenbeton wesentlich mehr Füllstoff und dafür weniger Splitt sowie als Bindemittel ein hochviskoses Bitumen. Gußasphalt wird mit einem Bindemittelüberschuß hergestellt, so daß er in erhitztem Zustand gieß- und streichfähig ist und keiner Verdichtung bedarf. Er ist praktisch hohlraumfrei. Die Aufbereitung erfolgt in Anlagen oder besonderen *Kochern*, in denen das Gemisch dann gleich zur Einbaustelle transportiert werden kann. Der maschinelle Einbau des Gußasphalts setzt sich gegenüber dem bisher üblichen Handeinbau durch.

Zementbeton-Deckschichten sind hohlraumarme Deckschichten nach dem Betonprinzip, die zugleich Deckschicht und obere Tragschicht darstellen.

Zementbeton besteht aus natürlichen und gebrochenen Zuschlagstoffen, Zement als Bindemittel, Wasser zur chemischen Umwandlung des Zements sowie Zusätzen, wie luftporenbildenden Stoffen. Zementbetondeckschichten weisen eine hohe Tragfähigkeit und einen hohen Widerstand gegen mechanische und atmosphärische Einflüsse sowie gegen die Bildung von Unebenheiten auf. Nachteile sind u. a. die lange Zeitdauer vom Einbringen des Betons bis zur Übergabe an den Verkehr, das Auftreten von Rissen bei ungleichmäßiger Tragfähigkeit der Gründung, die aufwendigen Maßnahmen zur Rekonstruktion zerstörter bzw. nicht ausreichend tragfähiger Deckschichten und die Notwendigkeit, Fugen einzubauen. Die Fugen werden durch Einrütteln in den Frischbeton oder durch Einschneiden in den erhärteten Beton hergestellt. Das Ausfüllen dieser Fugen mit bituminösen Vergußstoffen verhindert das Eindringen von Wasser in die Gründung. Man unterscheidet nach der Richtung *Quer-* und *Längsfugen*, nach der Herstellung *Raum-*, *Schein-* und *Preßfugen* (Abb. 15.11.4-2). Zur Sicherung der Höhenlage benachbarter Platten sowie zur Lastübertragung werden diese in der Regel im Bereich der Fugen mit Dübeln (bei Raum-Querfugen) bzw. Stahlankern versehen. Die Zementbetondeckschicht wird entsprechend der Tragfähigkeit der Gründung auf eine untere Tragschicht oder eine *Sauberkeitsschicht* aus Kiessand mit Ölpapierabdeckung aufgebracht. Auf die seitlichen Schalungsschienen stützt sich gleichzeitig die Arbeitsmaschine ab. Beim Einsatz eines Gleitschalungsfertigers wird die seitliche Begrenzung durch eine Schlepp- (Gleit-) Schalung gewährleistet. Auf das Planum werden die Fugeneinlagen gestellt. Der in einer Mischanlage hergestellte Beton wird in Spezialfahrzeugen antransportiert, verteilt und die Deckschicht mit einem Straßenfertiger, der den Beton abgleicht, verdichtet und glättet, hergestellt. Nach der Fertigstellung ist die Deck-

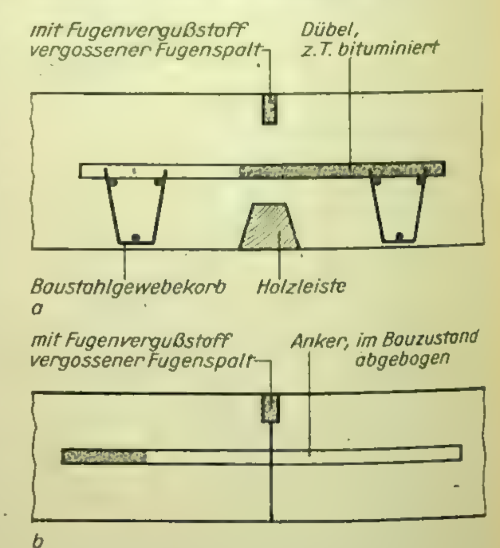


*Abb. 15.11.4-2 Fugenausbildung: **a** Querfuge als verdübelte Scheinfuge, **b** Längsfuge als verankerte Preßfuge*

schicht gegen Sonne und Regen sowie gegen Wasserentzug zu schützen. Nach 28 Tagen Erhärtungsdauer erfolgt die Übergabe an den Verkehr.

Sonstige Befestigungen. Die Anwendung von *Pflasterdeckschichten* ist auf ein Minimum zurückgegangen, weil diese Arbeit nicht mechanisiert werden kann. Der Einsatz von Pflaster beschränkt sich auf die Befestigung kleiner Flächen, die besonderen Beanspruchungen unterliegen. Dazu gehören Wendestellen für Kettenfahrzeuge, Haltebuchten für Busse, Tankstellen, Straßen mit einer Längsneigung über 7%. Für Fahrbahnen werden Pflastersteine als Klein- oder als Großpflastersteine (Größe [10 × 10 × 10] cm bzw. [20 × 20 × 20] cm) geliefert. Den Anforderungen genügen natürliche Steine z. B. aus Granodiorit oder künstliche aus Kupferschlacke. Pflastersteine werden in Reihen- oder Bogenform in ein Sand- oder Zementmörtelbett gesetzt, die dabei entstehenden Fugen durch das Einkehren von Sand unter Zugabe von Wasser verfüllt. Als Abschluß folgt das Rammen, wodurch die einzelnen Steine fest in die Bettung gedrückt werden und unter den Verkehrseinwirkungen nicht mehr nachgeben. Die Fugen können auch mit einem bituminösen Vergußstoff oder mit Zementmörtel verfüllt werden.

Für *Baustraßen* hat sich der Montagebau durchgesetzt. Die Platten werden auf einer mindestens 10 cm dicken Unterbettungsschicht verlegt. Plattentyp und Hebezeug müssen aufeinander abgestimmt sein. Für Platten ≦ 0,72 t werden Fahrlader, für Platten ≧ 0,72 t Autokräne eingesetzt. Die Fugen zwischen den Platten sind vor der Verkehrsübergabe mit Sand zu verfüllen.

Oberflächenschutzschichten sind bituminöse dünne Schichten, die durch eine *Oberflächenbehandlung* oder als *bituminöse Schlämme* auf hohlraumreiche Deckschichten aufgebracht werden, damit Oberflächenwasser und Schmutz nicht in die Poren eindringen können. Bei der Straßeninstandhaltung werden neben diesen Schutzschichten noch *Bitumenmikrobeton* und *Asphaltmastix* sowie *Mischsplitt* für dünne bituminöse Verschleißschichten eingesetzt, damit die Deckschichten wieder den Anforderungen des Verkehrs gerecht und den äußeren Einflüssen gegenüber widerstandsfähig werden. Ebenheit und Tragfähigkeit lassen sich allerdings nicht mit einer Schutzschicht verbessern. Alle Deckschichten, auf die eine Schutzschicht aufgebracht werden soll, müssen profiliert, geflickt und sauber sein.

Oberflächenbehandlung bedeutet, das auf die zu behandelnde Fahrbahn Bindemittel (Bitumen, Verschnittbitumen, Bitumenemulsion) aufgespritzt wird, darauf mit dem *Splittstreuer* Splitt

aufgestreut und dieser mit Gummirad- oder Glattwalzen angedrückt wird.

Bituminöser Schlamm ist ein kalteinbaufähiges breiiges Gemisch aus Sand, Füllstoff, Wasser und bituminösem Bindemittel (meist Bitumenemulsion), das auf die Deckschicht aufgebracht und mit Schiebern verteilt wird. Der Wasseranteil bedingt, daß die Schicht vor der Verkehrsfreigabe ausgetrocknet sein muß. *Bitumenmikrobeton* ist ein heißeinbaufähiges, feinkörniges, in Mischanlagen aufbereitetes Bitumen-Brechsand-Füllstoff-Gemisch mit einem Größtkorn von 4 mm. Es wird mit Straßenfertigern 10 bis 25 mm dick eingebaut und mit Walzen verdichtet.

Asphaltmastix ist eine in heißem Zustand gießfähige Masse aus Sand, Füllstoff und hochviskosem Bitumen, die wie Gußasphalt aufbereitet und mit Hand auf der Fahrbahn verteilt wird. Da dieses Gemisch nach dem Einbau nicht standfest ist, wird es zur Versteifung mit Splitt abgedeckt und danach gewalzt.

15.11.5. Straßeninstandhaltung

Die Erhaltung des Gebrauchswerts der Straßen erfordert regelmäßige Instandhaltungsmaßnahmen, die entweder nach einem Zyklensystem oder nach dem Zustand der Straßenverkehrsanlage festgelegt werden.

Instandhaltung der Deckschichten. Hierzu gehören Arbeiten zur Verhütung von Schadstellen, Beseitigung von Schadstellen (z. B. Schlaglochflickung), Sicherung der Fahrbahnränder durch Kantenflickung, Absiegeln von porigen sowie spröden bituminösen Verschleißschichten durch Oberflächennachbehandlungen, durch Bitumenschlämme oder Aufbringen dünner Verschleißschichten, ferner Fugenpflege und das Heben abgesunkener Platten bei Zementbetondeckschichten.

Die *Pflege der Nebenanlagen* umfaßt u. a. Räumung der Randstreifen und Gräben, Unkrautbekämpfung, Pflege von Rasen und Bepflanzungen.

Zur *Wartung der Verkehrszeichen und Leiteinrichtungen* zählen das Aufstellen, Reinigen, Auswechseln von Verkehrszeichen, Aufbringen der Fahrbahnmarkierung.

Bauliche Leistungen, die über den Rahmen der Instandhaltung hinausgehen, dienen der *Straßenerhaltung*. Diese Arbeiten umfassen u. a. Erneuerung abgenutzter Verschleißschichten durch Umpflastern, Aufbringen bituminöser Verschleiß- oder Schutzschichten u. a.

16. Technik der Verkehrsmittel

Das Verkehrswesen ist einer der wichtigsten Bereiche der materiellen Produktion und erfordert zur Durchführung seiner Aufgaben, den Transport von Gütern und Personen, einen wesentlichen Teil der materiell-technischen Basis der Gesellschaft. Von der Qualität und Zuverlässigkeit der Transportmittel und der Transportorganisation hängt weitgehend die Effektivität der Volkswirtschaft ab.

Zur Realisierung der Transportprozesse können verschiedene Transportmittel eingesetzt werden, wobei als Auswahlkriterium die *Transportleistung* als Produkt aus Transportmenge und Geschwindigkeit, $P_T = m \cdot v$, herangezogen wird. Die Transportleistung ist nicht mit der Leistung im physikalischen Sinne identisch.

Die Transportleistung des Schiffsverkehrs wird vorwiegend durch Betonung der Menge (Masse) erbracht, während die relativ geringe Geschwindigkeit eine entsprechend langfristige Disposition voraussetzt.

Im Eisenbahnverkehr wird die Transportleistung durch große Mengen bei relativ niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten erreicht. Der Eisenbahnverkehr ist häufig ein sog. „*gebrochener Verkehr*", weil zu und von Bahnhöfen noch andere Transportmittel zwischengeschaltet werden müssen.

Mit Kraftfahrzeugen kann nur eine verhältnismäßig kleine Nutzmasse, diese jedoch mit großer Durchschnittsgeschwindigkeit, direkt von der Verladerampe des Lieferers zum Empfänger befördert werden. Diese Flexibilität, in vielen Fällen auch die Unabhängigkeit von hochwertig ausgebauten Fahrwegen, gestattet kurzfristige Dispositionen. Dadurch lassen sich erhebliche Lagerkosten einsparen.

Der Luftverkehr erbringt seine großen Transportleistungen in erster Linie durch die gegenüber allen anderen Transportmitteln deutlich größere Geschwindigkeit.

Die Eigenarten der verschiedenen Transportmittel erlauben meist eindeutig die Wahl des Transportmittels, wobei Wasser-, Schienen- und Luftfahrzeuge meist auf den Verbund mit anderen Transportmitteln angewiesen sind.

Die *Raumfahrt* läßt sich gegenwärtig noch nicht unmittelbar zum Verkehrswesen rechnen, erfüllt jedoch durchaus auch Transportaufgaben, wie sie beim Zubringerverkehr zu den Raumstationen deutlich werden.

16.1. Bahntechnik – Bahnbetrieb

16.1.1. Bahnanlagen

Bahnanlagen sind ortsfeste Anlagen einer Eisenbahn, die nach baulichen Gesichtspunkten und betrieblicher Funktion unterschieden werden. Der Eisenbahnbaudienst gliedert den Bahnkörper in *Oberbau* und *Unterbau.*

Oberbau. Zum Oberbau gehören *Gleis* und *Bettung*. Er bildet damit die eigentliche Fahrbahn.

Das *Gleis* besteht aus Schienen, Schwellen und Befestigungsmaterial zum sicheren Tragen und Führen der Fahrzeuge. Vormontierte Gleise ohne Bettung nennt man *Gleisjoch*. Neue Betonschwellen-Gleisjoche sind in der Regel 25 m lang.

Schienen werden aus hochwertigem Walzstahl hergestellt. Sie werden bezeichnet nach ihrer Querschnittsgestaltung, z. B. Breitfußschiene (Abb. 16.1.1-1, links), und nach ihrer Masse je Meter Schienenlänge, z. B. S 49 für 49 kg/m. Schienen mit hoher Tragfähigkeit und Verschleißfestigkeit werden auf 50 bis 75 kg/m gewalzt.

Schwellen bestehen aus Holz, Stahlbeton oder Stahl. Sie sind quer zur Gleisrichtung angeordnet, sichern den Schienenabstand, d. h. die Spurweite, und dienen der Übertragung und Verteilung der Fahrzeuglasten auf die Bettung. Die Schwellenlänge für normalspurige Gleise beträgt 2,30 bis 2,50 m, die Masse einer Stahlbetonschwelle 230 bis 250 kg.

Befestigungsmittel, als *Kleineisen* bezeichnet, stellen die kraftschlüssige Verbindung zwischen Schienen und Schwellen sowie zwischen den Schienen untereinander her. Entsprechend der Bedeutung und Belastung werden verwendet: *Schwellen-* und *Hakenschrauben* mit Rippenplatten (K-Oberbau, Abb. 16.1.1-1, rechts), *Schwellenschrauben* oder *Federnägel* mit Unter-

lagsplatten, bei einfachsten Bedingungen nur *Schienennägel*.
Die *Bettung* übernimmt die gleichmäßige Lastverteilung auf den Unterbau sowie die Entwässerung und Durchlüftung des Oberbaus. In Hauptgleisen besteht das Bettungsmaterial aus Hartgesteinschotter mit Korngrößen von 25 bis 56 mm. Bei Gleisen von geringerer Bedeutung werden Kies, Sand oder Hochofenschlacke als Bettung verwendet.
Durchgehend verschweißte Gleise. Bei Neubau und Gleisauswechslung verlegt man i. allg. vorgefertigte *Gleisjoche*, die untereinander verschweißt werden. Dadurch spart man Unterhaltungskosten, verbessert den Reisekomfort und ermöglicht eine geringere Beanspruchung von Gleisen und Fahrzeugen. Diese Gleise erfordern jedoch eine hohe Rahmensteifigkeit zur Vermeidung von Gleisverwerfungen. Die Spannungen durch Temperatureinflüsse dürfen nicht größer werden als der Längs- und Querverschiebewiderstand des Gleises.
Spurweite. Sie ist das Maß zwischen den Schienenköpfen eines Gleises, gemessen senkrecht zur Gleisachse und wegen der Schienenkopfabrundung 14 mm unterhalb der Schienenoberkante. Die Eisenbahnen aller Länder verwenden fast 30 Spurweiten. Man unterscheidet die Gruppen Normal-, Breit- und Schmalspur.
Die *Normal-* oder *Regelspurweite* beträgt 1435 mm. Dieses Maß verwendete *G. Stephenson* beim Bau der ersten öffentlichen Eisenbahn von Stockton nach Darlington (englisch $4' + 8^1/_2''$).
Der Anteil der Normalspurbahnen an den Eisenbahnen der Welt beträgt ≈ 64 %. Sie befinden sich vorwiegend in Europa (außer Irland, Portugal, Spanien, UdSSR), in der VR China, Nord- und Mittelamerika, vereinzelt in Südamerika, Nordafrika und Australien.
Der Anteil der *Breitspur-* und *Schmalspurbahnen* beträgt jeweils ≈ 18 %.
Spurerweiterung in geraden Gleisen als Folge des Betriebs darf in der Regel aus Sicherheitsgründen 30 mm nicht überschreiten. In Bogengleisen mit Radien < 250 m ist allerdings eine Spurerweiterung von 5 bis 20 mm je nach Krümmung vorgeschrieben zur Vermeidung des Zwängens und Entgleisens der Achsen im Bogenlauf.
Spurwechsel ist ein Vorgang beim Übergang von Fahrzeugen zwischen unterschiedlichen Spurweiten. Im Fernreiseverkehr werden beim Übergang zwischen Normal- und Breitspur die Radsätze oder Drehgestelle der Eisenbahnwagen ausgetauscht. Die bekannteste Spurwechselanlage dieser Art befindet sich in Brest (UdSSR). Dort werden die Wagenkästen mittels Hebeböcken angehoben und die Drehgestelle ausgewechselt (*Umsetzverfahren*). Ein anderes Verfahren ist das *Umspuren* von *Spurwechselradsätzen*, wobei die Räder auf der Achswelle in eine Umspuranlage selbsttätig bei Schrittgeschwindigkeit des Wagens seitlich verschoben und arretiert werden. Für den Übergang normalspuriger Wagen auf das Schmalspurnetz werden in Mitteleuropa *Rollwagen* oder *-böcke* verwendet, auf denen die normalspurigen Fahrzeuge einschließlich ihrer Achsen fest verankert werden.
Gleisabstand nennt man den Abstand der Symmetrieachsen benachbarter Gleise. Bei Neubauten der DR werden als Kleinstwerte für Streckengleise 4,25 m und für Bahnhofsgleise 4,75 m gefordert.
Die *Weiche* ist ein Gleiselement, das den Übergang von Fahrzeugen von einem in ein anderes Gleis ohne Fahrtunterbrechung ermöglicht (Abb. 16.1.1-2). In der Grundform wird das gerade Gleis als *Stammgleis* und das gekrümmte Gleis als *Zweiggleis* bezeichnet. Die wichtigsten Bestandteile der Weiche sind *Fahrschienen*, *Zungenvorrichtungen*, *Weichenverschluß*, *Herzstück*, *Radlenker*, Befestigungsmaterial und ein spezieller Schwellensatz. Die *Zungen* sind entweder federnd (*Feder[schienen]zunge*) oder auf einem Drehstuhl schwenkbar (*Gelenkzunge*) gelagert. Die beiden Zungenspitzen der einfachen Weiche sind durch eine Verbindungsstange über den Weichenspitzenverschluß miteinander verbunden und werden durch diesen in jeweils einer Endlage verschlossen. Endlage bedeutet, daß

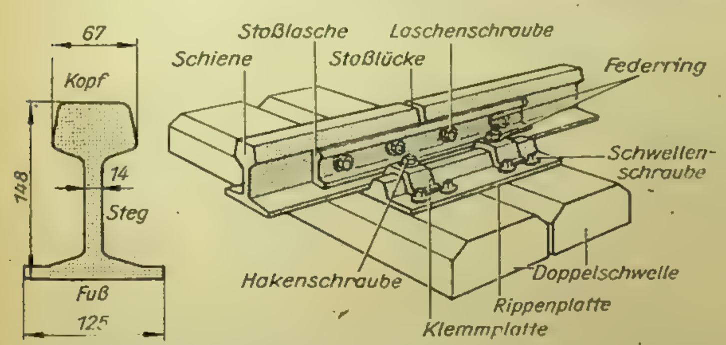


Abb. 16.1.1-1 Querschnitt der deutschen Breitfußschiene „S 49" (links) und Schienenbefestigung an einem Schienenstoß (K-Oberbau) (rechts)

eine Zunge fest an der *Backenschiene* anliegt und die andere für das Passieren des Spurkranzes weit genug abliegt. Das *Herzstück* befindet sich an der Schnittstelle einander kreuzender Schienen. Die Führung der Fahrzeuge über die Schienenunterbrechung erfolgt durch den *Radlenker* an der gegenüberliegenden Schiene.

halb erfolgt bei Umbauten der komplexe Einsatz hochleistungsfähiger Maschinen, wie *Schotterbettreinigungsmaschinen*, Planierraupen, *Gleisjochverlegekrane* bzw. *-geräte*, *Gleisstopf-*, *-nivellier-* und *-richtmaschinen*.
Instandhaltung. Die turnusmäßige Instandhaltung der Gleise ist die *planmäßige Durcharbeitung*, deren Abstände abhängig sind von der betrieblichen Bedeutung und Belastung sowie vom baulichen Zustand der Strecke. Sie umfaßt

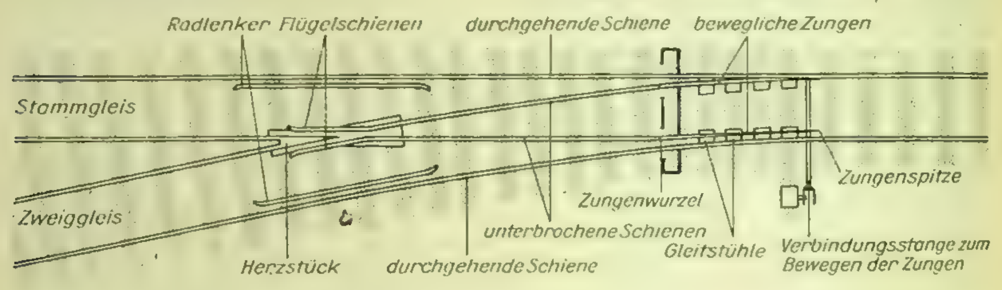


Abb. 16.1.1-2 *Einfache Linksweiche*

Abgeleitet von der Grundform und angepaßt an betriebliche Aufgaben gibt es
- *Innen-* und *Außenbogenweichen*,
- ein- und zweiseitige *Doppelweichen*,
- einfache und doppelte *Kreuzungsweichen*,
- einfache und doppelte *Innen-* und *Außenbogenkreuzungsweichen*.

Die Weichenradien der Grundform ermöglichen folgende zulässige Geschwindigkeiten im Zweiggleis:

$r = 190$ m	$v_{zul} = 40$ km/h
$r = 300$ m	$v_{zul} = 50$ km/h
$r = 500$ m	$v_{zul} = 65$ km/h
$r = 1200$ m	$v_{zul} = 100$ km/h

Die Weichenbezeichnung erfolgt bei der DR nach Schienenart, Radius des Zweiggleises in Metern und Endneigung von Stamm- und Zweiggleis zueinander; für eine einfache Weiche z. B. EW 49 – 1200 – 1:18,5.
Der *Antrieb* der Weichenzungen erfolgt elektrisch oder mechanisch, meist vom Stellwerk aus, aber auch am Ort mit Hilfe eines Gewichtshebels.
Kreuzungen sind erforderlich bei höhengleichem Schnitt zweier Gleise ohne Übergangsmöglichkeit von einem Gleis zum anderen. Bei Krümmung der Gleise entsteht eine *Bogenkreuzung*.
Zum *Gleisbau* zählen alle Arbeiten am Oberbau, wie Neubau, Umbau und Instandhaltung.
Neubau. Die Bauarbeiten können dabei technisch und technologisch optimal abgewickelt werden, weil störende Beeinflussungen durch den Eisenbahnbetrieb nicht stattfinden.
Umbau. Die Auswechslung und Erneuerung der Gleise findet in Sperrzeiten statt, die im Interesse der Betriebsabwicklung nur im unbedingt erforderlichen Maße gewährt werden können. Des-

die Mängelbeseitigung an Unterbau, Bettung und Gleis, um deren Funktionstüchtigkeit laufend zu erhalten. Bei zwischenzeitlicher Instandhaltung, der sog. *kleinen Unterhaltung*, handelt es sich um die schnelle Beseitigung örtlich begrenzter Schäden mit Hilfe geeigneter Kleingeräte, die leicht, transportabel und schnell einsetzbar sind sowie eigenen Antrieb besitzen.
Unterbau. Zum *Unterbau* zählen die Teile des Bahnkörpers, die den Oberbau tragen und die mit dessen Hilfe flächenhaft verteilten Fahrzeuglasten aufnehmen. Das sind *Dämme* und *Einschnitte* zum Ausgleich von Unebenheiten des Geländes, *Entwässerungseinrichtungen*, wie Böschungen und Gräben, und *Kunstbauten*, wie Tunnel, Brücken, Durchlässe, Stützmauern, Lawinenschutzbauten usw. Die obere Begrenzungsfläche des Unterbaus ist das *Planum*.

16.1.2. Bestimmung der Bahnanlagen

Nach volkswirtschaftlicher Bedeutung werden Haupt- und Nebenbahnen eingerichtet, die sich hinsichtlich baulicher Gestaltung und technischer Ausrüstung unterscheiden. Auf *Hauptbahnen* sollen hohe Fahrgeschwindigkeiten, die Beförderung schwerer Züge und eine dichte Zugfolge möglich sein. Für den *Neubau von Hauptbahnen* werden folgende Forderungen erhoben: minimaler Bogenradius $r_{min} = 300$ m, maximale Längsneigung $i_{max} = 12{,}5‰$, zulässige *Achsmasse* $m_{zul} = 21$ t, technische Sicherung aller Wegübergänge, Ausrüstung der Strecken und Bahnhöfe mit bestmöglicher *Sicherungs-* und *Fernmeldetechnik*.
Nebenbahnen erfüllen Zubringeraufgaben zur Hauptbahn. Bei sehr geringen Betriebsaufgaben wird die Betriebsabwicklung stark vereinfacht.

Man unterscheidet Bahnanlagen der freien Strecke, der Bahnhöfe und sonstigen Bahnanlagen (Abb. 16.1.2-1). Auf der freien Strecke und auf den Bahnhöfen sind für betriebliche Aufgaben *Betriebsstellen*, wie Stellwerke, Schrankenposten, Befehlsstellen, vorhanden.

Bahnanlagen der freien Strecke. Als Grenze zwischen Bahnhof und freier Strecke gelten die *Einfahrsignale*, falls nicht vorhanden, die *Einfahrweichen*.

Außer dem Bahnkörper zählen zu den Bahnanlagen der freien Strecke elektrische *Fahrleitungen*, *Signal-* und *Sicherungsanlagen*, *schienengleiche Wegübergänge* sowie Hochbauten.

Fahrordnung. Auf zweigleisigen Strecken wird i. allg. jedes Gleis nur in einer Richtung befahren. Bei den meisten Eisenbahnen besteht *Rechtsbetrieb*. Strecken mit mehr als 2 Gleisen werden im *Linien-* oder *Richtungsbetrieb* befahren. Häufig wird unterschieden nach *Reisezug-* und *Güterzuggleisen* bzw. nach *Fern-* und *Vorort-(S-Bahn)gleisen*.

An *Abzweigstellen* können Züge ein Gleis der freien Strecke verlassen und dieses damit für einen anderen Zug freigeben bzw. in ein solches Gleis einfahren. Sie sind i. allg. mit Hauptsignalen ausgestattet.

Anschlußstellen ermöglichen das Zuführen und Abholen von Eisenbahnfahrzeugen zu und von Gleisen, die an das Streckengleis angeschlossen sind. Das Streckengleis darf während dieser Zeit nicht von anderen Zügen befahren werden. Wird während der Bedienung das Streckengleis für einen anderen Zug freigegeben, so handelt es sich um eine *Ausweichanschlußstelle*.

Haltepunkte dienen der Abwicklung des Reiseverkehrs auf der freien Strecke. Sie sind nicht mit Weichen ausgestattet. *Deckungsstellen* sind ständig oder vorübergehend eingerichtete Bahnanlagen zum Schutz beweglicher Brücken, Gleiskreuzungen, Baustellen u. ä. gegen unzulässiges Befahren.

Blockstellen [engl. to block = sperren] regeln den Raumabstand der Züge untereinander (vgl. 16.1.3.) mit Hilfe von Hauptsignalen (Tafeln 90 und 91).

Bahnanlagen der Bahnhöfe. Auf Bahnhöfen dürfen Züge beginnen, enden, kreuzen (Ausweichen von 2 entgegengesetzt fahrenden Zügen auf eingleisiger Strecke), überholen oder mit Gleiswechsel wenden. Ein Bahnhof muß mit mindestens einer Weiche ausgestattet sein. Außer Gleisen und Weichen gehören i. allg. zum Bahnhof Gebäude, Bahnsteige, Signale, Rampen, Ladeanlagen usw.

Bahnhofsgleise werden eingeteilt in Hauptgleise, durchgehende Hauptgleise und Nebengleise. *Hauptgleise* werden von Zügen im regelmäßigen Betrieb befahren, z. B. Einfahr-, Ausfahr-, Überholungs- und Kreuzungsgleise. Hauptgleise der freien Strecke und ihre Fortsetzung durch den Bahnhof sind *durchgehende Hauptgleise*. Alle anderen Bahnhofsgleise sind *Nebengleise*, z. B. Abstell-, Rangier- und Triebfahrzeugumlaufgleise. Innerhalb großer Bahnhöfe liegen meist *Bahnbetriebswerke* und *Bahnbetriebswagenwerke* als technische Dienststellen zur Behandlung und Unterhaltung der Triebfahrzeuge und der Eisenbahnwagen.

Nach der baulichen Gestaltung unterscheidet man *Durchgangs-* und *Kopfbahnhöfe* (mit

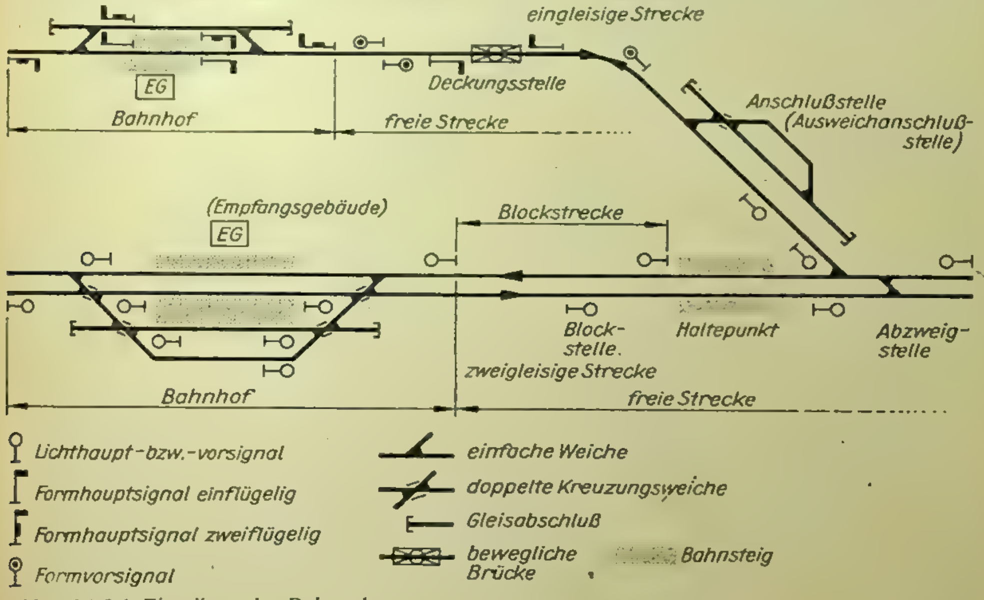


Abb. 16.1.2-1 *Einteilung der Bahnanlagen*

stumpf endenden Hauptgleisen) sowie *Flach-* und *Gefällebahnhöfe*.
Entsprechend den Transportaufgaben gibt es Bahnhöfe mit spezieller Funktion:
Personenbahnhöfe sind fast ausschließlich für den Personen-, Reisegepäck-, Expreßgut- und Postverkehr bestimmt.
Abstellbahnhöfe liegen in der Nähe großer Personenbahnhöfe zum Abstellen und zur Einsatzvorbereitung der Reisezüge.
Güterbahnhöfe dienen dem Güterumschlag, in der Regel für größere Einzugsbereiche als *Stückgut-* und *Wagenladungsknotenbahnhöfe*. Sie sind mit Ladeanlagen und -geräten ausgestattet. Einige Güterbahnhöfe sind für bestimmte Aufgaben spezialisiert, z. B. Kohle-, Dünger-, Baustoff-, Containerumschlag.
Rangierbahnhöfe für das Auflösen und Bilden von Güterzügen liegen in Zentren des Eisenbahnnetzes. Von der Längen- und Breitenausdehnung sind sie die größten Bahnhöfe überhaupt (vgl. 16.1.6.). Rangierbahnhöfe in Schwerpunktbetrieben der Volkswirtschaft sind *Industrie-*, *Werk-* und *Hafenbahnhöfe*.
Sonstige Bahnanlagen für den Bau und Betrieb der Eisenbahn sind z. B. Wasserwerke, elektrische Fernleitungen, Ausbesserungswerke u. ä.

16.1.3. Eisenbahn-Sicherungsanlagen

Zur sicheren Durchführung des Eisenbahnbetriebs werden Stellwerks- und Blockanlagen, Signale, Fernsteueranlagen, Wegübergangssicherungen und Zugbeeinflussungsanlagen eingesetzt. Die technischen Einrichtungen sollen die Durchführung der Zugfahrten (bei modernen Sicherungsanlagen auch Rangierfahrten) auf richtig eingestellten und gesicherten Fahrwegen — *Fahrstraßen* — gewährleisten sowie Zusammenstöße und gefährliche Annäherungen (Zuggefährdungen) vermeiden. Darüber hinaus dienen die Sicherungsanlagen der schnellen und wirtschaftlichen Transportführung, der Senkung des Arbeitskräfteaufwands, der Erhöhung der Durchlaßfähigkeit der Bahnanlagen sowie der Entbindung der Eisenbahner von körperlich schwerer und geistig eintöniger routinehafter Arbeit.
Stellwerke sind zentrale Betriebsstellen zum Bedienen von Signalen, Weichen, Gleissperren und Riegeln mit Signalabhängigkeit. *Signalabhängigkeit* heißt: Ein Hauptsignal *kann* erst in Fahrtstellung gebracht werden, wenn alle Weichen, Gleissperren und Riegel richtig eingestellt werden und festgelegt sind. Sie bleiben mindestens so lange verschlossen, wie das Hauptsignal auf Fahrt steht.
Bei *mechanischen Stellwerken* werden die Stellhebel manuell bewegt. Die Kraftübertragung zu den Antrieben erfolgt über doppelte *Drahtzugleitungen*. Die Abhängigkeiten innerhalb eines Stellwerks erreicht man hauptsächlich durch mechanische Bauelemente, zu anderen Stellwerken durch den *Bahnhofsblock*. Die Stellhebel sind auf einer *Hebelbank* angeordnet. Längenänderungen in den Drahtzugleitungen durch Temperatureinflüsse werden durch *Spannwerke* ausgeglichen. Die maximalen Stellentfernungen betragen bei Weichen ≈ 400 m, bei Signalen ≈ 1 200 m.
Bei *elektromechanischen Stellwerken* bewirken Elektromotore das Umstellen der Signale, Weichen und Gleissperren, die den Strom von den Stellwerken erhalten. Die *Hebel* zum Einleiten der Umstellvorgänge sind Drehschalter. Abhängigkeiten zwischen Weichen und Signalen innerhalb des Stellwerks werden auch hier vorwiegend mechanisch erzeugt.
Gleisbildstellwerke sind *elektrische Stellwerke*, bei denen die Gleisanlage des Bahnhofs oder des Stellwerkbezirks auf dem *Stelltisch* oder auf einer besonderen *Meldetafel* unmaßstäblich nachgebildet ist. Zum Bedienen werden *Druck-* oder *Zugtasten* verwendet, die meist den Symbolen der Gleise, Signale und Weichen auf dem Gleisbild direkt zugeordnet sind. Der Bediener verfolgt mit Hilfe der *Gleisbildausleuchtung* die Stellung der Weichen und Signale, die Besetzung der Gleise sowie den Verlauf der Zug- und Rangierfahrten. Zug- und Rangierfahrstraßen werden durch gleichzeitiges Betätigen von 2 Tasten (Start- und Zieltaste) eingestellt. Die richtige Lage der Weichen, ihre Festlegung und die Fahrtstellung des Signals werden daraufhin automatisch herbeigeführt. Mit Hilfe von Gleisbildstellwerken kann die Betriebsführung zentralisiert werden. Bei *Zentralstellwerken* unterscheidet man *Knotenfernsteuerung* — Zusammenfassung aller Stellwerke eines Eisenbahnknotens — und *Streckenfernsteuerung*.
Signale übermitteln Informationen in der Bedeutung von Befehlen, Aufträgen und Meldungen zwischen den Eisenbahnern des stationären Dienstes und dem fahrenden Personal. Man unterscheidet ortsfeste Signale, solche an Fahrzeugen und von Eisenbahnern manuell und/oder akustisch abzugebende Signale.
Hauptsignale sind als Form- oder Lichtsignale ausgebildet und werden je nach Aufgabe als Einfahr-, Ausfahr-, Zwischen-, Deckungs- oder Blocksignale verwendet. Die Stellung der Hauptsignale wird in der Regel im Bremswegabstand zuvor durch die *Vorsignale* angekündigt (Tafeln 90 und 91).
Das Lichtsignalsystem der OSShD (Organisation für die Zusammenarbeit der Eisenbahnen der sozialistischen Länder) vereinigt in einem Signal den Hauptsignalbegriff für den unmittelbar anschließenden Abschnitt und den Vorsignalbegriff für den darauf folgenden Abschnitt. Es gestattet die Anzeige der Geschwindigkeitsstufen „40 km/h", „60 km/h", „100 km/h" und „Höchstgeschwindigkeit" für je 2 Abschnitte.

Der Haltbegriff gilt absolut für Zug- und Rangierfahrten.

Blockanlagen sind elektrische Sicherungseinrichtungen, die Abhängigkeiten zwischen mehreren Stellwerken eines Bahnhofs, den *Bahnhofsblock*, bzw. zwischen benachbarten Betriebsstellen der freien Strecke (Abzweig-, Block-, Ausweichanschlußstellen) und den Bahnhöfen, den *Streckenblock*, herstellen.

Bahnhofsblockanlagen gewährleisten die Signalabhängigkeit, die Befehlsgewalt des Fahrdienstleiters über alle Hauptsignale sowie den Verschluß der Weichen, Gleissperren und Riegel bis zum Abschluß der Zugfahrt. In der Regel arbeiten je 2 *Blockfelder* auf verschiedenen Stellwerken zusammen. Dabei wird eins geblockt, das andere entblockt, z. B. *Befehlsabgabe – Befehlsempfang* für die Signalbedienung, *Zustimmungsabgabe – Zustimmungsempfang* für die Sicherung eines Teils der Zugfahrstraße, die über mehrere Stellwerksbezirke verläuft, *Fahrstraßenfestlegung – Fahrstraßenauflösung* für Weichen, Gleissperren und Riegel.

Streckenblockanlagen sind ein technisches System zur Sicherung der Zugfahrten auf der freien Strecke.

Der *eingleisige Streckenblock* schützt einen Zug gegen andere nachfolgende und entgegenkommende Züge. Der *zweigleisige Streckenblock* übernimmt den Schutz vor nachfolgenden Zügen (Raumabstand). Nach der Wirkungsweise unterscheidet man den handbedienten *Felderblock*, den halbautomatischen *Relaisblock* und den automatischen Streckenblock (*Selbstblock* mit zugbedienten Hauptsignalen).

Wegübergangssicherungsanlagen. Zur Sicherung von Kreuzungen zwischen Eisenbahngleisen und Straßen in einer Ebene müssen bei Hauptbahnen stets und bei Nebenbahnen nach Erfordernis technische Einrichtungen eingesetzt werden. *Voll-* und *Anrufschranken* werden durch Wärter bedient. *Haltlicht-* und *Halbschrankenanlagen* werden durch das Befahren von Kontakten durch den Zug an- und abgeschaltet. Bei Annäherung von Schienenfahrzeugen, rotem Blinklicht sowie bei sich schließenden oder geschlossenen Schranken haben Straßenbenutzer vor den *Warnkreuzen* des Wegübergangs anzuhalten.

Zugbeeinflussung ist die Einwirkung von außen auf die Zugfahrt, wenn der Triebfahrzeugführer nicht entsprechend der Signalstellung das Triebfahrzeug bedient. Könnte dadurch eine Gefahr für den Zug entstehen, leitet sie automatisch die Zwangsbremsung ein.

Mechanische Fahrsperren bei der Berliner S-Bahn z. B. bewirken bei Haltstellung des Signals das Abschalten der Stromzuführung und die *Schnellbremsung*.

Induktive Zugbeeinflussung (*Indusi*) wirkt elektromagnetisch. Sie wird durch Gleismagnete eingeleitet, die an Haupt- und Vorsignalen sowie an anderen Stellen der Strecke eingebaut sind. Diese Zugbeeinflussung muß auf Strecken vor-

handen sein, die mit mehr als 120 km/h befahren werden sollen.

In Zukunft wird auch die *linienförmige* Zugbeeinflussung verwendet werden, die die Kontrolle und Einwirkung auf den Zug an jedem Punkt der Strecke ermöglichen wird.

16.1.4. Eisenbahn-Fernmeldeanlagen

Die Eisenbahn-Fernmeldeanlagen übertragen auf elektrischem Wege Informationen vom Menschen oder von technischen Einrichtungen oder feststehende oder einstellbare Verbindungen an andere Menschen oder technische Einrichtungen. Sie dienen damit der unmittelbaren Abwicklung des Eisenbahnbetriebs.

Fernsprechanlagen. Fernsprechverbindungen ermöglichen die unmittelbare Verständigung der ortsfesten Betriebsstellen der Bahnhöfe und der freien Strecke untereinander. *Zugmeldeeinrichtungen* sind ausschließlich dem Zugmeldeverfahren (vgl. 16.1.3.) vorbehalten. *Dispatcheranlagen* sind Wechselsprechanlagen zur Leitung und Kontrolle des operativen Eisenbahnbetriebsdienstes.

Funkanlagen. Drahtlose Verbindungen vermitteln Informationen zwischen ortsfesten Betriebsstellen und bewegten Einheiten, z. B. Triebfahrzeug, Rangierleiter, Aufsicht. Sie werden insbesondere im Rangierdienst angewendet.

Fernsehanlagen. Für außer Sichtweite liegende wichtige Betriebsvorgänge werden Fernüberwachungs- und -beobachtungsanlagen eingesetzt, z. B. Bahnsteigbeobachtung, Feststellen des Schlußsignals einfahrender Züge, Beobachtung von schienengleichen Wegübergängen.

Weiterhin gehören zu den Eisenbahn-Fernmeldeanlagen Fernschreib-, Melde-, Uhren- und Lautsprecheranlagen.

Das *Betriebsfernmeldenetz* der DR dient dem gesamten innerdienstlichen Fernsprechverkehr. Die *Bahnselbstanschlußanlage* (*Basa*) ermöglicht den Verbindungsaufbau einschließlich Fernwahl durch den Teilnehmer selbst. Für den Fernschreibverkehr besteht die *Bahnfernschreibselbstanschlußanlage* (*Bafesa*), die analog dem Telex-System der Deutschen Post arbeitet.

16.1.5. Eisenbahnfahrzeuge

Beim Gütertransport mit der Eisenbahn liegt der Leistungsaufwand deutlich unter dem des Straßentransports, weil die *Rollreibung* nur 10 % von der des Straßenverkehrs beträgt. Außerdem erlauben die hohe Tragfähigkeit der Gleise und deren geringe Störanfälligkeit ein starkes Verkehrsaufkommen.

Um- und Begrenzungen. Eisenbahnfahrzeuge und deren Ladung dürfen *Begrenzungen* nicht überragen, wobei nach diesen die *Umgrenzungen*, die Lichtraumprofile, festgelegt werden, die den freien Raum über und neben den Gleisen darstellen. Benachbarte Anlagen, wie Brücken, Tunnel, Bahnsteige, Gebäude u. a., dürfen die Umgrenzungslinie nicht überragen.

Ausrüstung von Eisenbahnfahrzeugen. Jedes Eisenbahnfahrzeug hat ein Laufwerk, eine Zug- und Stoßvorrichtung und — außer manche Güterwagen — eine Bremse.

Laufwerk. Die *Radsätze* der Eisenbahnfahrzeuge bestehen aus der Stahlwelle und 2 Walzstahl- oder Stahlgußradkörpern in Form einer gewölbten Scheibe oder mit Speichen, auf die die Radreifen aufgeschrumpft sind. Zur Verringerung der unabgefederten Massen und damit Schonung des Oberbaus werden *Leichtradsätze* mit hohler Achswelle und leichtem Scheibenradkörper oder auch mit Leichtmetallkörpern ausgerüstet. Das *Monoblock-* oder *Vollrad*, bei dem Radkörper und -reifen aus einem Stück geschmiedet oder gewalzt sind, wird vielfach für hohe Geschwindigkeiten benutzt. Bei Nahverkehrsfahrzeugen wird durch Einbau von Gummielementen in den Radkörper eine zusätzliche Federung erreicht. Dadurch werden gleichzeitig die unabgefederten Massen verringert, ein guter Fahrzeuglauf und eine Schonung des Oberbaus erzielt. Das gleiche gilt für luftbereifte Räder, wobei jedoch die *Luftreifen* nur eine Achskraft von 25 kN erlauben und deshalb Drehgestelle mit bis zu 5 Achsen verwendet werden.

Schienenfahrzeuge haben meist außerhalb der Räder sitzende *Achslager*. Die Ausnahme bilden Dampflokomotiven mit Normalspur, bei denen sie innen sind. Während früher vor allem *Gleitlager* verwendet wurden, werden jetzt *Rollenlager* (vgl. 9.1.4.) eingesetzt, die weniger Wartung bedürfen, dabei gleichzeitig den Anfahrwiderstand und das Auftreten von Heißläufern wesentlich verringern.

Die *Federung* übernimmt die Abstützung des Wagenkastens bzw. des Triebfahrzeugaufbaus auf den Radsätzen. Hierzu dienen vor allem Blatt- oder Schraubenfedern, in den letzten Jahren auch Gummi-, Luft- und vereinzelt Drehstabfedern. Luftfedern sind elastische Umhüllungen, die als Falten- oder Rollbälge ausgebildet sind. Durch Verändern des Luftdrucks wird eine gleichmäßige, von der Belastung unabhängige Abfederung erreicht. Güterwagen haben i. allg. eine einfache Federung, während bei Drehgestellen von Reisezugwagen und modernen Triebfahrzeugen eine mehrfache Federung eingebaut wird.

Zug- und Stoßeinrichtungen dienen zur Übertragung der Zugkräfte des Triebfahrzeugs sowie der Pufferdruckkräfte beim Bremsen und Auflaufen, gleichzeitig werden die Eisenbahnfahrzeuge elastisch verbunden. Bei den europäischen Normalspurbahnen ist die Zugvorrichtung mit der Schraubenkupplung von der Stoßvorrichtung mit den Puffern getrennt.

Die *Zugvorrichtung* ist gefedert. Bei älteren Fahrzeugen ist sie mit durchgehender Zugstange, bei neueren und bei Spezialwagen geteilt. Die Zugvorrichtung besteht aus einem Haken, einem Bügel und einer Spindel mit Rechts- und Linksgewinde, mit der die Kupplung angespannt werden kann.

Als *Stoßvorrichtung* wird vor allem der *Hülsenpuffer* verwendet. Hierbei ist der *Pufferteller* mit einer kräftigen zylindrischen Hülse verbunden, die in einer 2. Hülse geführt wird. Während früher die nur wenig Stoßenergie verzehrende Kegelfeder mit Stumpfkegelquerschnitt eingesetzt wurde, wird jetzt zumeist die energieverzehrende *Ringfeder* (Abb. 16.1.5-1) benutzt. Die zug- und druckbeanspruchten Innen- und Außenringe, deren kegelförmige Berührungsflächen aufeinander gleiten, wandeln Stoßenergie in Reibungswärme um. Verwendet werden auch *Gummifedern*, bei denen anstelle der Stahlfedern ringförmige Gummielemente eingebaut sind, deren Dämpfungsarbeit jedoch nicht an die der Ringfeder heranreicht. Hydraulische und pneumatische Puffer werden trotz ihrer Vorzüge nur vereinzelt eingesetzt, weil der Wartungsaufwand sehr hoch ist. Die jeweils konvex gewölbten Pufferteller müssen durch eine ausreichende Größe die Pufferberührung auch im Gleisbogen oder bei verschiedener Höhe der jeweiligen Stoßebenen (beladen und nicht beladen) an beiden Fahrzeugen gewährleisten.

Selbsttätige *Mittelpufferkupplungen* haben keine Seitenpuffer und vereinen Zug- und Stoßvorrichtung in einem Bauteil. Die *bewegliche Mittelpufferkupplung*, bei der die Kupplungsköpfe zum Ausgleich unterschiedlicher Höhen der Fahrzeuge senkrecht gegeneinander verschiebbar sind, ist bereits seit geraumer Zeit in der Sowjetunion eingeführt. Die *starre Mittelpuf-*

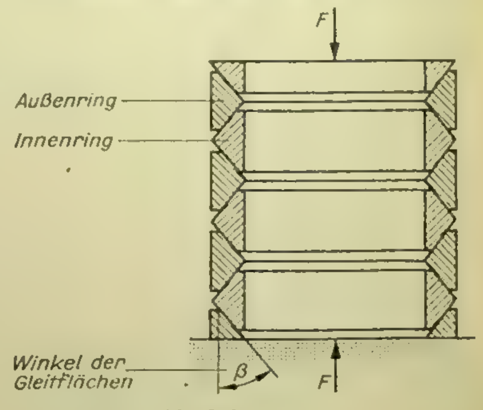


Abb. 16.1.5-1 *Ringfeder*

ferkupplung, z. B. *Scharfenberg-Kupplung* bei den Wagen der S-Bahn, hat den Vorteil, daß gleichzeitig mit der mechanischen Verbindung auch Luft- und durchgehende Steuerleitungen verbunden werden, während dies bei der beweglichen Bauart von Hand geschehen muß. Die Entwicklungen bei den Bahnen verschiedener Länder, um Wagen mit beweglicher und starrer Mittelpufferkupplung miteinander verbinden zu können, sind praktisch abgeschlossen. Die allgemeine Einführung der Mittelpufferkupplung verzögert sich wegen des dafür notwendigen sehr hohen Aufwands.

Bremsen. Die am meisten verbreiteten Formen sind die *Klotz-* und die *Scheibenbremse*, deren Bremswirkung durch die Reibung zwischen dem Rad und einem *Bremsklotz* (mit Bremssohle aus Grauguß oder Plast) oder zwischen Bremsbacken und einer Bremsscheibe entsteht. Die Auslösung erfolgt meist durch Druck- oder Saugluft, durch einen Elektromagneten (bei *Magnetschienenbremsen*), durch eine *Strömungsbremse* (bei Dieseltriebfahrzeugen mit spezieller Ausführung einer Strömungskupplung) oder im einfachsten Fall beim Güter- und Einzelwagen durch eine von Hand betätigte Spindel oder einen Hebel. Die durch den Zug durchgehenden Bremsen wirken selbsttätig, so daß bei unbeabsichtigter Zugtrennung die Zugteile zum Halten kommen. Bei durchgehenden Bremsen läßt sich die Bremswirkung stufenweise steigern. Viele Bauarten erlauben auch ein stufenloses Lösen der Bremsen. Schnellfahrende Fahrzeuge, moderne Straßenbahnwagen und einige Leichttriebwagen besitzen oft zusätzlich eine *Magnetschienenbremse*, deren Abbremsung von der magnetisch erzeugten Anpreßkraft auf die Schiene und von der Haftreibung zwischen Bremsschuh und Schiene abhängig ist. Bei *Wirbelstrombremsen* bleibt ein Spalt von ≈ 10 mm zwischen Bremse und Schiene, so daß die Wirbelstromeffekte wirken können (vgl. 11.1.2.).

Triebfahrzeuge. *Dampflokomotiven* weisen ausschließlich eine Kolbendampfmaschine auf (vgl. 2.6.2.), während man mit Dampfturbinen oder mit Dampfmotoren bisher nur Versuchslokomotiven ausrüstete.

Den Dampferzeuger bildet bei den meisten Lokomotiven ein Rauch- und Heizrohrkessel, der mit Stückkohle (Steinkohle, z. T. Braunkohlenbriketts), Öl, seltener mit Kohlenstaub, beheizt wird. Durch den aus einer Düse (*Blasrohr*) in die Rauchkammer strömenden Abdampf wird ein Unterdruck in der Rauchkammer erzeugt, somit Frischluft durch den Feuerungsrost angesaugt und das Feuer selbsttätig angefacht. Die Dampfmaschine kann 2, 3 oder 4 *Zylinder* haben. Vom Kolben wird die Kraft über *Kolbenstange*, *Kreuzkopf* und *Treibstange* auf die *Treibachse* übertragen, die durch *Kuppelstangen* mit weiteren Achsen (*Kuppelachsen*) verbunden ist, um eine größere Zugkraft zu erzielen. Kolbendampflokomotiven erreichen i. allg. über 3 MW (> 4000 PS) Leistung. Ihre Vorteile sind geringe Störanfälligkeit, Anspruchslosigkeit in der Unterhaltung und hohe Lebensdauer. Ihr entscheidender Nachteil ist, daß die Brennstoffenergie nur zu 4 bis 11 % ausgenutzt wird. Seit Jahren wird sie daher bereits durch Diesel- und Elektrolokomotiven ersetzt.

Dieseltriebfahrzeuge sind mit *Dieselmotoren* ausgerüstet, die den besonderen Anforderungen des Eisenbahnbetriebs entsprechen — u. a. hohe Betriebsdauer und -sicherheit, kleine Abmessungen, hohe Leistung bei geringer Eigenmasse, einfache Bedienung und Wartung sowie hohe Wirtschaftlichkeit auch im Teillastbereich — und häufig zur Steigerung der Leistung aufgeladen werden (vgl. 2.6.2.). Dieselmotoren moderner Konstruktion nutzen die Kraftstoffenergie bis ≈ 35 % aus. Einmotorige *Diesellokomotiven* werden je nach ihrer Aufgabe ab ≈ 74 kW (100 PS) als kleine Rangierlokomotiven, bis 4,85 MW (6600 PS) als Fernschnellzug- und schwere Güterzuglokomotiven gebaut. *Dieseltriebzüge* bestehen meist aus 2 Maschinenanlagen mit einer Gesamtleistung bis > 1,47 MW (2000 PS) und 2 bis 5 Mittelwagen. An die Stelle des 2. Maschinenwagens tritt mitunter am Zugende ein Steuerwagen (ohne Maschinenanlage) mit Führerstand, von dem aus bei Fahrtrichtungswechsel über Direktleitungen gesteuert werden kann. Beide Endfahrzeuge haben i. allg. dieselbe Kopfform.

Leichttriebwagen fahren einzeln oder bilden mit Beiwagen und einem Steuerwagen einen Triebwagenzug. Dieser wird in Stahlleicht-, Leichtmetall- oder Verbundbauweise mit Schaumstoff ausgeführt. Wegen der Unterfluranordnung der gesamten Maschinenanlage ist deren Leistung auf ≈ 515 kW (700 PS) begrenzt. Sie werden meist auf kürzeren Strecken eingesetzt.

Die *Kraftübertragung* von den Dieselmotoren auf das Laufwerk erfolgt bei geringen Leistungen durch mechanische Schaltgetriebe mit mehreren Stufen. Bei der *hydraulischen Kraftübertragung* werden Strömungsgetriebe (vgl. 9.1.7.) mit 1 bis 3 Kreisläufen verwendet. Moderne Rangierlokomotiven werden mit *Strömungswendegetrieben* ausgerüstet, die jeweils besondere Kreisläufe für Vorwärts- und Rückwärtsfahrt haben. Das Einstellen des Richtungswechsels kann bereits während der Fahrt erfolgen, wobei die für die Gegenrichtung vorgesehenen Kreisläufe als *Strömungsbremse* wirken und der Fahrtrichtungswechsel bedeutend schneller möglich ist. Bei *dieselelektrischen* Fahrzeugen wird von mit den Dieselmotoren gekuppelten Generatoren Strom zum Antrieb von Elektromotoren (Fahrmotoren) erzeugt, die auf die Antriebsachsen wirken.

Gasturbinentriebfahrzeuge, d. h. Lokomotiven und Triebwagen mit Antrieb durch eine oder

mehrere Gasturbinen haben gegenüber Dieseltriebfahrzeugen die Vorteile, daß man billigeren Kraftstoff verwenden und eine größere Leistung installieren kann. Fahrzeuge bis zu 6,25 MW (8 500 PS) sind erprobt, aber die Leistungsgrenze ist damit noch nicht erreicht. In der Sowjetunion wird an Entwürfen von Gasturbinenlokomotiven für den Einsatz auf der Baikal-Amur-Magistrale (BAM) gearbeitet. Die Kraftübertragung geschieht mechanisch über ein Schaltgetriebe, elektrisch über Generator und Fahrmotoren oder hydraulisch durch Strömungsgetriebe.

Elektrische Triebfahrzeuge werden vor allem in Ländern verwendet, die reichlich über nutzbare und günstig verteilte Wasserkraftreserven zur Erzeugung von Elektroenergie verfügen. Dagegen setzen Länder mit vornehmlich Wärmekraftwerken elektrische Triebfahrzeuge vor allem auf Strecken mit hohem Verkehrsaufkommen ein. Das größte elektrifizierte Streckennetz besitzt die Sowjetunion mit ≈ 3,7 · 10^4 km Länge, das entspricht ≈ 25 % der elektrischen Bahnstrecken der gesamten Welt. In der DDR sind bisher über 10 % des Gesamtnetzes elektrifiziert.

Gegenwärtig sind Elektrolokomotiven (in einer Sektion) bis ≈ 7,85 MW Dauerleistung im Einsatz. Ihr Wirkungsgrad, d. h. Ausnutzung der Primärenergie, beträgt ≈ 20 %.

Elektrische Triebfahrzeuge sind geräuschärmer als Dampf- und Diesellokomotiven, erzeugen keine Rauch- und Abgase und haben aufgrund kurzer Überlastbarkeit der Fahrmotoren eine höhere Anfahrbeschleunigung. Ihre sehr hohe Geschwindigkeit wird nur von modernen Gasturbinentriebfahrzeugen überboten. Bereits 1955 wurde bei Fahrversuchen der Französischen Staatsbahnen mit 331 km/h die bis damals höchste Geschwindigkeit im Eisenbahnwesen erreicht. In Japan verkehren auf der in Normalspur gebauten Tokaido-Strecke elektrische Triebwagenzüge mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 210 km/h, bei Versuchsfahrten wurden bereits 259 km/h erreicht.

Stromarten. Elektrische Triebfahrzeuge werden mit Gleichstrom, einphasigem Wechselstrom, selten mit Drehstrom gespeist. In der DDR, der BRD, Österreich, der Schweiz sowie Schweden und Norwegen wird *Einphasenwechselstrom* mit $16^2/_3$ Hz von 15 kV Fahrdrahtspannung verwendet, in anderen Ländern, besonders in Frankreich, der Ungarischen VR, der ČSSR, liegen bereits gute Erfahrungen mit 50 Hz (Landesfrequenz) und 25 kV vor, so daß ≈ 15 % des gesamten elektrischen Streckennetzes mit dieser Stromart versehen ist. Mit Gleichstrom werden ≈ 32 % des Streckennetzes betrieben (ČSSR, VR Polen, UdSSR, Frankreich, Belgien, Niederlande, Italien, SFR Jugoslawien u. a.), und den ähnlichen Anteil haben die Strecken mit $16^2/_3$ Hz. Einphasenwechselstrom hat gegenüber dem Gleichstrom den Vorteil, daß er auf große Entfernungen übertragen werden kann. In Italien ist man von der Verwendung des Drehstroms wegen der zweipoligen Oberleitung, die Schiene bildet die dritte Phase, und deren komplizierter Schaltung sowie anderer Schwierigkeiten abgegangen.

Die meisten Lokomotiven sind für eine Stromart gebaut. Zur Überbrückung von unterschiedlichen Stromsystemen einzelner Länder gibt es *Mehrsystem-Triebfahrzeuge* für 2 bis 4 Stromsysteme, z. B. Zweisystem-Lokomotiven für Gleich- und Wechselstrom, die sich oftmals beim Übergang von einem zum anderen Netz selbsttätig umschalten. *Zweikraftlokomotiven* können wahlweise mit Fahrdraht oder Dieselgenerator bzw. Akkumulatoren fahren, z. B. Bergbau- und Rangierlokomotiven.

Der Wechselstrom von $16^2/_3$ Hz wird entweder in eigenen *Bahnkraftwerken* oder in öffentlichen Kraftwerken mit besonderen Generatoren erzeugt. Dieser Strom braucht eigene Zuführungsleitungen zum Bahnnetz. Wird dagegen Industriestrom aus dem jeweiligen Landesnetz benutzt, ist dieser nur über einfache Einphasenumspannwerke zu leiten, deren Anlagen weniger aufwendig und billiger als bei Verwendung von $16^2/_3$-Hz-Einphasenstrom sind. Dieses Stromsystem wird vor allem verwendet, wenn ein Land die Bahnelektrifizierung gerade beginnt oder diese gleichzeitig mit der Landeselektrifizierung erfolgt. Eine Umstellung eines bestehenden Stromnetzes von Gleichstrom oder $16^2/_3$-Hz-Wechselstrom auf 50-Hz-Wechselstrom ist i. allg. ökonomisch nicht vertretbar.

Stromweg. Vom Fahrdraht über den *Scherenstromabnehmer* mit Schleifstücken geht der Strom (z. B. 15 kV) über einen *Transformator*, der die Fahrdrahtspannung auf ≈ 300 bis ≈ 600 V senkt, zu den *Fahrmotoren*. Die Rückleitung des elektrischen Stroms geschieht – wie bei der Straßenbahn – über die Fahrschienen.

Fahrmotoren – Kraftweiterleitung. Leistungsstarke elektrische Lokomotiven haben i. allg. *Einzelachsantrieb*. Dieser wird in vielen Fällen durch *Tatzlagermotoren* (Abb. 16.1.5-2) über Zahnradvorgelege verwirklicht. Während der Motor auf einer Gehäuseseite federnd im Rahmen aufgehängt ist, stützt sich die andere Seite mit 2 angegossenen Tatzlagern auf der Treib-

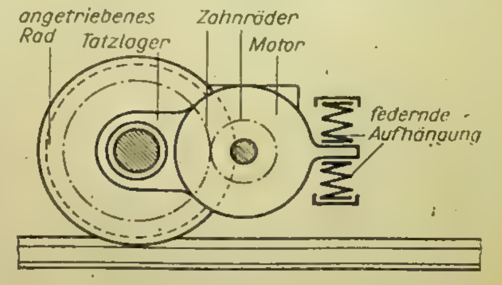


Abb. 16.1.5-2 *Tatzlagermotor*

achse ab. Eine Weiterentwicklung des Tatzlagermotorantriebs ist der *Gummifederantrieb*, der auch für Geschwindigkeiten > 100 km/h geeignet ist. Die Hohlwelle mit 2 Großzahnrädern und kräftigen Auslegern stützt sich über Gummisegmente auf dem Radkörper ab, und es entsteht eine drehelastische Verbindung zwischen Hohlwelle und Treibrad. Der *Gestellmotor* liegt i. allg. über der Treibachse im Drehgestellrahmen. Er ist vollkommen abgefedert und für schnellfahrende Lokomotiven geeignet. Das Drehmoment wird über eine *Gelenk-* oder *Federkupplung* übertragen. Sie muß das Federspiel zwischen dem gefederten Motor und der unabgefederten Treibachse ausgleichen. Eine andere Lösung bietet der Einbau nur eines Fahrmotors je Drehgestell, wobei die einzelnen Achsen über Zahnräder gekuppelt sind und die Schleudergefahr durch Entlastung einzelner Achsen beim Anfahren verringert wird. Vereinzelt wird noch der Stangenantrieb verwendet, vor allem bei Rangierlokomotiven und schweren, langsamfahrenden Güterzuglokomotiven. Über den oftmals im Hauptrahmen gelagerten Fahrmotor werden die Achsen über eine Blindwelle und Kuppelstangen angetrieben.

Elektrische Speichertriebwagen werden im Nahverkehrsnetz eingesetzt, wo sich der Bau einer Fahrdrahtleitung nicht lohnt. Als Energiequelle dienen große Akkumulatoren (bis ≈ 700 Ah), die mit billigem Nachtstrom aufgeladen werden. Sie ermöglichen (ohne Zwischenaufladung) einen Fahrbereich bis 350 km und eine Höchstgeschwindigkeit von ≲ 100 km/h. Durch energieverlustlose Steuerungen, wobei bei längeren Neigungsfahrten die Batterien aufgeladen werden können, wird der Fahrbereich erweitert. Bei Fahrten unter Oberleitungen ist ebenfalls ein Aufladen möglich. Andere Ausführungen fahren wechselweise mit Batterien und einem Dieselgenerator.

Eisenbahnwagen. Eine große Anzahl ***Personenwagen*** in Stahlbauweise mit tragendem Gerippe aus Profilstahl und Bekleidungsblechen wird gegenwärtig noch eingesetzt. Moderne Personenwagen werden in *Stoffleichtbau* unter Einsatz von Leichtmetallen und Plasten oder im *Formleichtbau* unter Einbeziehung möglichst aller Bauteile zum Tragen hergestellt. Darunter fällt auch der Einsatz von Stranggußprofilen, die mehrere Einzelprofile enthalten und Schweiß- sowie Anpassungsarbeiten ersparen. Neuerdings werden auch Sandwichplatten verwendet, die aus 2 Deckschichten, z. B. Aluminiumbleche mit zwischengelagertem Stützstoff, meist Schaumstoff, bestehen und durch Profile miteinander verbunden sind. Die *Türen* sind meist Drehtüren mit doppeltwirkendem Verschluß, vereinzelt auch Schiebetüren. Bei Wagen mit Mittelgang (Ein- oder Zweiraumwagen) bzw. Seitengang (Abteilwagen) sind die Türen an den Wagenenden, für den Nahverkehr manchmal auch in Wagenmitte.

Bei älteren Fahrzeugen gibt es noch von Hand zu öffnende statische *Lüfter*, die oft auf dem Dach befestigt sind. Neubauwagen haben eine *Druckbelüftung*, bei der ein *Elektrolüfter* zwischen Decke und Wagendach installiert ist.

Für die *Beleuchtung* hat i. allg. jeder Wagen eine von einer Achse angetriebene Lichtmaschine. Eine Batterie übernimmt bei Stillstand oder langsamer Fahrt die Stromversorgung. Vereinzelt, vor allem im Vorort- oder Nebenbahnverkehr, gibt es eine geschlossene Zugbeleuchtung, d. h. ein Turbo- oder Dieselgenerator liefert über eine Speicherbatterie den Strom.

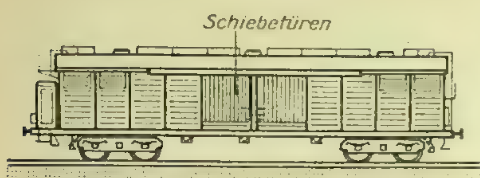
Die *Heizung* geschieht meist noch mit Dampf von der Lokomotive, seltener von einem Heizwagen aus, auf elektrifizierten Strecken mittels elektrischer Heizkörper in den Wagen. Es sind bereits Diesellokomotiven im Einsatz, bei denen Generatoren den Heizstrom liefern. Für besonders hohe Ansprüche und bei extremen klimatischen Verhältnissen werden die Wagen mit *Klimaanlagen* versehen.

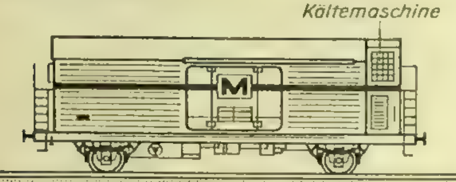
Klappbrücken ermöglichen den Übergang zwischen 2 Wagen, wobei *Gummiwülste*, seltener *Faltenbälge*, gegen Witterungseinflüsse schützen; vereinzelt dienen noch *Scherengitter* als Schutzgeländer.

Zum überwiegenden Teil werden einstöckige Wagen eingesetzt. Für den Kurz- und Mittelstreckeneinsatz dagegen gibt es oft *Doppelstockwagen* mit Sitzplätzen in 2 Ebenen (nur im Raum zwischen den Drehgestellen), wodurch eine bessere Ausnutzung der Wagenbegrenzung erfolgt. Die Doppelstock-Gliederzüge weisen einen intensiveren Leichtbaugrad auf und bieten einen wesentlich höheren Fahrgastkomfort. Im Ausland sind *Anderthalbdeckwagen*, *Aussichtswagen* u. a. üblich. Auf langen Strecken werden den Zügen *Speisewagen* mit eingebauter Küche sowie *Schlafwagen* mit 1 bis 3 Betten und eine Wascheinrichtung je Abteil bzw. *Liegewagen* mit 3 bis 6 Betten ohne Wascheinrichtung im Abteil zugeordnet. Auf sehr langen Strecken, z. B. in der UdSSR, sowie im grenzüberschreitenden Touristenverkehr können Züge ausschließlich aus Schlaf- bzw. Liegewagen bestehen. *Postwagen* dienen zur Beförderung (Sortierung während der Fahrt) von Postsendungen, *Gepäckwagen* entlasten den Reisenden von schwerem und sperrigem Gepäck.

Güterwagen werden in gedeckte, offene und Sonderwagen eingeteilt.

Gedeckte Wagen (Kurzzeichen *G*, Abb. 16.1.5-3) haben einen Wagenaufbau aus Holzbohlen, Hartfaserplatten oder Blech mit seitlichen Schiebetüren, für besondere Ladeaufgaben mit Stirnwandtüren. Ältere gedeckte Wagen sind meist zweiachsig und haben bei einer Ladelänge von 8 bis 11 m eine Ladefläche von 20 bis 30 m² und eine Tragfähigkeit von 15 bis





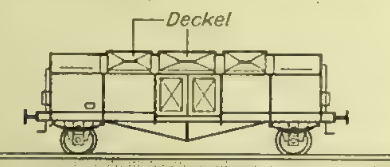


Abb. 16.1.5-3 Typen von Eisenbahnwagen

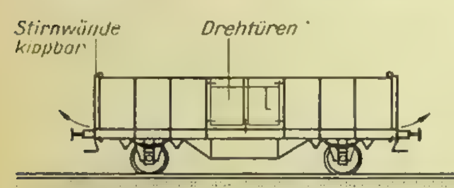






Abb. 16.1.5-4 Typen von Eisenbahnwagen

25 t, moderne vierachsige gedeckte Wagen haben eine Ladelänge von ≈ 14,5 m, eine Ladefläche von 40 m² und eine Tragfähigkeit bis ≈ 58 t. Einige Ausführungen, z. B. Gattung *T*, sind zum bequemen Be- und Entladen mit einem Schiebe- oder Klappdach versehen.

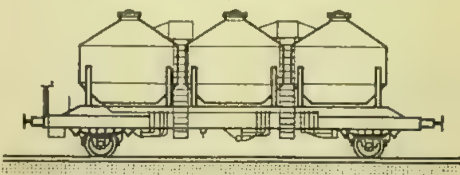
Kühlwagen (*I*) haben Doppelwände mit dazwischenliegendem Wärmedämmstoff, der bei modernen Wagen oft schon eingeschäumt ist, zweiflügelige, dichtschließende Drehtüren und z. T. Eisbehälter. *Maschinenkühlwagen* besitzen eine z. T. vollautomatisch arbeitende Kältemaschine, die nicht nur zur Kühlung dient, sondern bei sehr niedrigen Außentemperaturen empfindliche Güter auch auf einer festgelegten höherliegenden Temperatur halten kann. *Kühlzüge* bestehen aus einem zentralen Maschinenwagen mit mehreren Kältemaschinen und daran über Kälteleitungen angeschlossenen Kühlwagen. Seit den letzten Jahren gibt es auch Kühlwagen mit Flüssiggas-(Stickstoff-) Kühlung.

Offene Wagen (Abb. 16.1.5-4) haben einen Kastenaufbau (Wandhöhe von 1,0 bis 2,0 m, Wagengattungen *O* und *F*) mit seitlichen zweiflügeligen Drehtüren aus Blech oder Holz und für das Entleeren auf Kippanlagen oben drehbar gelagerte kippbare Stirnwände (vgl. Abb. 16.1.7-3). Die Ladelänge beträgt bis ≈ 12,40 m, die Ladefläche bis ≈ 34 m² und die Tragfähigkeit bis ≈ 59 t. Selbstentladewagen (*Ed*, *Fd*) haben Seitenklappen zum Entleeren.

Flachwagen (z. B. Gattung *Re*) haben niedrige Borde und lange Holzrungen. Die Stirnborde können bis auf die Puffer umgelegt werden und dienen als Überfahrbrücke.

Schienenwagen (*Sk*) sind mit aushebbaren oder umklappbaren stählernen Rungen versehen. *Tiefladewagen* (z. B. *Uiaa*) dienen zum Transport besonders großer und schwerer Güter (u. a. Transformatoren, Krane, Bagger); sie bestehen aus 2 Drehgestellgruppen mit jeweils bis zu 12 Achsen und aus einer Stahlträgerbrücke (Ladebühne), die die Last trägt. Drehschemelwagen (*Lck*, *Sck*), mit einem Drehschemel in der Mitte der Ladefläche zur Beförderung langer Holzstämme werden paarweise eingesetzt.

Spezialwagen (Abb. 16.1.5-5). Hierzu gehören die *Behälterwagen* (*Uc*, *U-x*) mit 2 oder 3 zylindrischen oder eckigen Behältern für Zement oder Kohlenstaub, die mit Druck- oder Saugluft bzw. entladen werden. *Kesselwagen* (*Uk*) haben



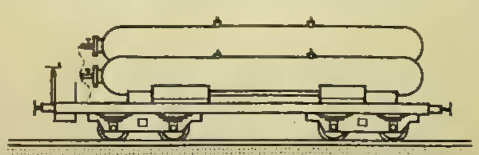


Abb. 16.1.5-5 Typen von Eisenbahnwagen

einen oder mehrere waagerechte Kessel für flüssige und gasförmige Güter; Sonderbauarten mit Holz- oder Aluminiumfässern dienen zum Weintransport, solche mit Druckgasbehältern zur Beförderung von Wasser- und Sauerstoff. In *Topfwagen* (*U-y*) mit großen Steingutfässern werden Säuren, Laugen u. a. ätzende Flüssigkeiten transportiert.

Wagen für *bahndienstliche Zwecke* sind z. B. Arzt- und Gerätewagen sowie Kranwagen (Eisenbahndrehkran bis ≈ 250 t Tragfähigkeit, vgl. 10.6.2.) von *Hilfszügen*, *Eichfahrzeuge* zum Prüfen der Gleiswaagen, *Schotterwagen* (meist Selbstentlader), *Untersuchungs-*, *Revisions-* und *Meßwagen* für Tunnel, Brücken, Oberbau, Fahrleitungen, Triebfahrzeuge und Wagen, sowie *Mannschaftswagen* für Bauzüge und *Unterrichtswagen*.

16.1.6. Eisenbahnbetrieb

Der Eisenbahnbetrieb umfaßt alle Maßnahmen und Tätigkeiten, die das Bewegen von Eisenbahnfahrzeugen für das Befördern (*Zugfahrdienst*) und Behandeln von Zügen, das Bedienen von Zusatzanlagen (*Rangierdienst*) sowie für die Durchführung von Kleinwagenfahrten. Kleinwagen sind kleine Baufahrzeuge, die aus konstruktiven Gründen besondere betriebliche Behandlung erfordern.

Der Eisenbahnbetriebsdienst beinhaltet vorbereitende Arbeiten, z. B. Fahrplanerarbeitung, Schaffung technischer und technologischer Voraussetzungen für den Betrieb, sowie Arbeiten zur unmittelbaren Betriebsdurchführung, z. B. Stellwerks-, Dispatcher-, Zugbegleit-, Rangierdienst.

Bei allen Weisungen und Handlungen haben Sicherheit und Pünktlichkeit der Beförderung Vorrang vor allen anderen Aufgaben.

Zugfahrt. Eine Zugfahrt ist die Fahrt eines Zuges auf freier Strecke sowie die Ein-, Aus- und Durchfahrt in einem Bahnhof.

Züge werden aus *Regelfahrzeugen* – Fahrzeuge, die aufgrund ihrer Bauart in Züge eingestellt werden dürfen – gebildet. Sie sind durch Maschinenkraft zu bewegen und dürfen auf die freie Strecke übergehen. Einzeln fahrende Triebfahrzeuge gelten als Züge. Bei *Wendezügen* behält das Triebfahrzeug beim Wechsel der Fahrtrichtung seinen Platz im Zuge bei.

Züge müssen an der Spitze und am Schluß durch Signale zur Feststellung der Fahrtrichtung und Vollzähligkeit gekennzeichnet sein.

Entsprechend der Aufgabenstellung werden Züge eingeteilt in

Reisezüge: Expreß-, Schnell-, Eil- und Personenzüge sowie Post-, Gepäck- und Expreßgutzüge;

Güterzüge: Schnellgüter-, Eilgüter-, Durchgangsgüter-, Nahgüter- und Übergabezüge;

Dienstzüge: z. B. Hilfs-, Probe- und Meßzüge.

In den Dienstfahrplänen wird eine weitere Unterteilung nach *Zuggattungen* vorgenommen, z. B. S-Bahn-Züge, Containerzüge, Leerwagenzüge, einzeln fahrende Triebfahrzeuge. *Regelzüge* verkehren nach dem Fahrplan täglich oder an bestimmten Tagen. *Sonderzüge* werden nur auf besondere Anordnung an einem einzelnen Tag oder während eines begrenzten Zeitraums gefahren. Zur eindeutigen Kennzeichnung erhält jeder Zug eine *Zugnummer*, die er während des gesamten Laufwegs beibehält.

Die *Zuglänge* wird in der Praxis nach der Anzahl der *Wagenachsen* ohne Triebfahrzeuge, seltener nach Metern bestimmt. In der Regel beträgt die größte Länge eines Reisezugs 60 Achsen, die eines Güterzugs 120 Achsen oder 600 m. Längere Züge dürfen nur mit Genehmigung der zuständigen Reichsbahndirektion gebildet werden. Die Zuglänge wird u. a. eingeschränkt durch die Länge der Bahnsteige, die Länge der Bahnhofsgleise, die Leistungsfähigkeit der Triebfahrzeuge und die Wirksamkeit der Bremsen.

Die Höchstgeschwindigkeit des Zuges resultiert aus der *Strecken-* und *Fahrzeuggeschwindigkeit*. Erstere ist die Geschwindigkeit, mit der Streckenabschnitte aufgrund ihres Oberbauzustands und der Linienführung höchstens befahren werden dürfen. Die Fahrzeuggeschwindigkeit darf ein Zug aufgrund der Bauart aller eingestellten Fahrzeuge und der Bremsausrüstung nicht überschreiten (Tab. 16.1.6-1). Die Höchstgeschwindigkeit wird für jeden Zug gesondert bestimmt. Als *Reisegeschwindigkeit* wird der Gesamtweg des Zugs dividiert durch die Gesamtreisezeit einschließlich aller Aufenthalte errechnet.

Tab. 16.1.6-1 *Allgemeine Höchstgeschwindigkeitsgrenzen für Züge bei der Deutschen Reichsbahn*

Reisezüge mit Zugbeeinflussung	140 km/h
Reisezüge ohne Zugbeeinflussung	120 km/h
Doppelstockgliederzüge im Wendezugbetrieb, Triebfahrzeug am Schluß	100 km/h
Güterzüge in Bremsstellung P (Personenzugbremse)	120 km/h
Güterzüge in Bremsstellung G (Güterzugbremse)	80 km/h
Arbeitszüge	50 km/h
handgebremste Züge	50 km/h

Die *Bremsausstattung* muß so beschaffen sein, daß der Zug aus der Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit innerhalb des Bremswegs auf Halt abgebremst werden kann. Als *Bremsweg* gilt der Abstand vom Vor- zum Hauptsignal. Seine Länge beträgt auf Hauptbahnen 700 bzw. 1000 m, auf Nebenbahnen 400 m. Für unterschiedliche Zugarten werden durch die *Brems-*

stellung Schnelligkeit und Stärke der Bremswirkung reguliert.
Vorrang haben dringliche Hilfszüge vor allen Zügen; bei Verspätungen oder Unregelmäßigkeiten haben weiterhin die schneller fahrenden Züge Vorrang vor den langsameren, die volkswirtschaftlich wichtigeren Züge vor den unwichtigeren, wenn die Reihenfolge verändert werden muß. Bei gleichwertigen Zügen haben i. allg. die durchfahrenden und die pünktlichen Züge den Vorrang.

Fahrplan. In ihm werden die Ankunfts-, Abfahrt- und Durchfahrtzeiten der Züge auf den Betriebsstellen verbindlich festgelegt. Dabei sind die Verkehrsbedürfnisse, die Gewährleistung der Sicherheit, die wirtschaftliche Betriebsführung und damit Masse und Länge der Züge, Bauart der Triebfahrzeuge, Höchstgeschwindigkeiten und Bremsbedingungen zu berücksichtigen. Man unterscheidet Einzelfahrpläne für Züge und Gesamtfahrpläne für Strecken und Netze. Die Abstimmung der Fahrpläne erfolgt auf den internationalen und nationalen *Fahrplankonferenzen*. Entsprechend dem schwankenden Verkehrsbedürfnis umfaßt der Jahresfahrplan 2 Abschnitte, den *Sommer-* und *Winterfahrplan*.
Der ***Bildfahrplan*** wird als Grundlage aller anderen Fahrpläne zuerst konstruiert (Abb. 16.1.6-2). In einem Netz von senkrechten Weg- und waagerechten Zeitlinien werden die Zugfahrten als Zeit-Wege-Linien (Zuglinien) vereinfacht dargestellt. Die Schnittpunkte der Zuglinien mit den Weg-(Orts-)Linien stellen die Ankunfts-, Abfahrt- oder Durchfahrtzeiten dar. Der Bildfahrplan vermittelt einen Überblick über die Fahrplanlagen aller Züge einer Strecke, die gegenseitige Abhängigkeit der Zugfahrten sowie die Streckenbelastung. Er ist deshalb geeignet für die Disposition, Durchführung und Überwachung des Zugfahrdienstes.
Aus dem Bildfahrplan werden für dienstliche Zwecke der *Buchfahrplan* für das Zugpersonal, der *Streckenfahrplan* für Betriebs- und Baustellen der freien Strecke und die *Bahnhofsfahrordnung* für das Bahnhofspersonal erarbeitet. Für den öffentlichen Gebrauch werden *Kursbücher*, *Taschenfahrpläne* und *Aushangfahrpläne* hergestellt.

Zugfahrdienst. *Zugmeldestellen*, wie Bahnhöfe und Abzweigstellen, regeln die Reihenfolge der Züge nach dem Fahrplan. Sie haben zu gewährleisten, daß für einen Zug das Streckengleis bis zur nächsten Zugmeldestelle von keinem Gegenzug beansprucht wird und daß ein Zug einem anderen Zug in gleicher Richtung in einem bestimmten Abstand, dem *Raumabstand*, folgt. *Zugfolgestellen* – Bahnhöfe, Abzweig- und Blockstellen – begrenzen einen Streckenabschnitt (Blockstrecke), in den ein Zug erst eingelassen werden darf, wenn ihn der vorausgefahrene Zug verlassen hat, und regeln auf diese Weise den Raumabstand. Durch das Einrichten von Blockstellen auf der freien Strecke kann demnach die Zugfolge verdichtet werden.
Zugmeldungen sind fernmündliche Informationen über die beabsichtigte oder die vollzogene Abfahrt oder Durchfahrt eines Zuges (*Vorausmeldung* bzw. *Abmeldung*) sowie über das Freisein von Blockstrecken nach stattgefundener Zugfahrt (*Rückmeldung*). Wegen ihrer Bedeutung für die sichere Betriebsabwicklung sind diese Meldungen im *Zugmeldebuch* nachzuweisen.
Auf jeder Zugfolgestelle ist ein *Fahrdienstleiter* eingesetzt, der für die Regelung der Zugfahrten in Zusammenarbeit mit dem Dispatcher verantwortlich ist. Seine wesentlichen Tätigkeiten

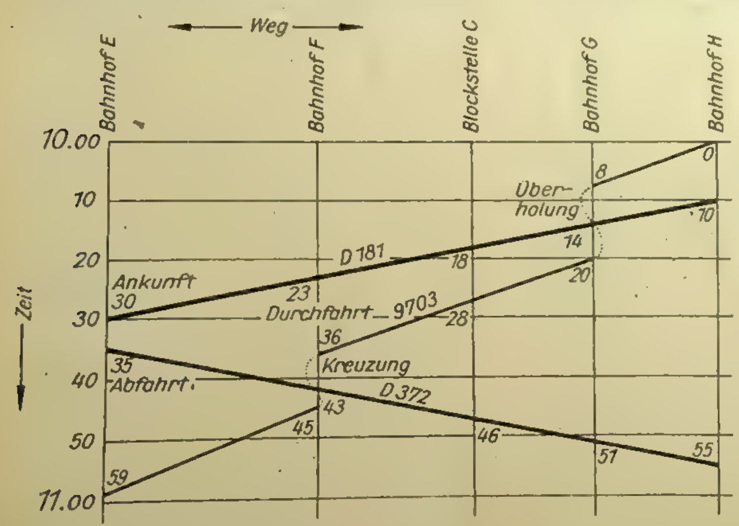


Abb. 16.1.6-2 Ausschnitt aus einem Bildfahrplan

dafür sind: Abgabe und Entgegennahme von Zugmeldungen, Sicherung der Zugfahrstraße und Erteilung des *Abfahrauftrags* (in der Regel durch Stellen des Hauptsignals auf Fahrt). Bedient er die Signale nicht selbst, dann muß der Wärter eines abhängigen Stellwerks in jedem Fall den Befehl dafür erhalten (meist durch den *Bahnhofsblock*). Auf großen Bahnhöfen gibt es mehrere Fahrdienstleiterbezirke.

Die *Aufsicht* – kenntlich durch die *rote Dienstmütze* – nimmt weitere Aufgaben des Zugfahrdienstes wahr, z. B. Kontrolle der Zugbildung, der Zugbereitstellung, der Beschilderung, Beheizung und Beleuchtung der Züge, Sicherung der Reisenden, Bekanntgabe von Verspätungen, Erteilen des *Abfahrsignals* an Reisezüge mit dem *Befehlsstab* (Stab mit runder weißer Scheibe mit grünem Rand) oder mit der grün abgeblendeten *Signallampe*. Auf kleinen Bahnhöfen kann ein Beschäftigter die Aufgabe des Fahrdienstleiters und der Aufsicht führen.

Der *Rangierleiter* – kenntlich durch den *roten Erkennungsstreifen* um die Kopfbedeckung – ist für die zweckmäßige und sichere Durchführung der Rangierfahrten verantwortlich; für einzeln fahrende Triebfahrzeuge ist es der jeweilige Stellwerkswärter. Er hat alle am Rangieren Beteiligten, z. B. Triebfahrzeugführer, Stellwerkswärter, Rangierer, über Ziel, Weg und Zweck der Rangierfahrt zu unterrichten. Zum Ingangsetzen und Anhalten der Rangierabteilung gibt er optische und akustische *Rangiersignale*. Auf großen Rangierbahnhöfen koordiniert der *Rangiermeister* die Arbeit mehrerer Rangierleiter.

Rangiertechnik. Technologische Verfahren für das Rangieren sind das Umsetzen, Abstoßen und Ablaufen der Fahrzeuge.

Umsetzen. Das Triebfahrzeug bleibt vom Beginn bis zum Ende der Rangierfahrt mit den Wagen

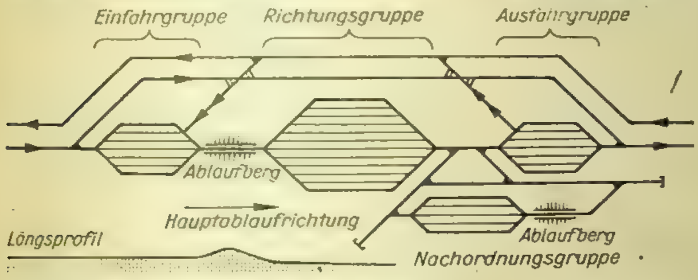


Abb. 16.1.6-3 Gleisgruppen im Rangierbahnhof

gekuppelt. Umsetzen erfordert den größten Zeitaufwand aller Verfahren, ermöglicht aber die schonendste Behandlung der Fahrzeuge und des Ladeguts.

Abstoßen. Das Triebfahrzeug beschleunigt die geschobene Rangierabteilung auf die Abstoßgeschwindigkeit und bremst dann schnell auf Halt. Der abgekuppelte Wagen oder die Wagengruppe rollt dann im freien Ablauf zu einem weiter entfernten Laufziel.

Ablaufen. Das Triebfahrzeug drückt einen Zug bis zum Gipfel des Ablaufbergs. Die abgekuppelten Einzelwagen oder Wagengruppen rollen von dort frei oder durch Bremsmittel beeinflußt zu dem tiefer liegenden Laufziel im Bestimmungsgleis. Ablaufen ist ein sehr leistungsfähiges Rangierverfahren und wird auf allen großen Rangierbahnhöfen angewendet.

Rangierbahnhöfe in Knotenpunkten des Eisenbahnnetzes dienen dem Auflösen und Bilden von Güterzügen. Je nach Größe beträgt der tägliche Ausgang 1 500 bis 5 000 Wagen. Die Gleisgruppen (Abb. 16.1.6-3) haben verschiedene Funktionen.

Einfahrgruppe. Ankommende Güterzüge werden wagentechnisch untersucht sowie betrieblich und verkehrlich auf die notwendige Zerlegung vorbereitet.

Der *Zugführer* – bei Reisezügen kenntlich durch *rotes Erkennungsband* – nimmt auf Betriebsstellen, die nicht mit einer Aufsicht besetzt sind, deren Aufgaben wahr. Er benutzt für das Erteilen des *Abfahrsignals* eine grün-weiß-karierte Flagge bzw. ein grünes Licht. Weiterhin ist er während der Zugfahrt weisungsberechtigt gegenüber dem *Zugpersonal*.

Der *Triebfahrzeugführer* setzt den Zug gemäß Abfahrauftrag des Fahrdienstleiters (bei Reisezügen nach dem Abfahrsignal der Aufsicht bzw. des Zugführers) in Bewegung. Er hat alle Signale konsequent zu beachten und die nach Fahrplan vorgeschriebenen Geschwindigkeiten und Zeiten einzuhalten. Er muß *Streckenkenntnis* besitzen.

Rangierdienst. Er umfaßt das Bilden, Umbilden und Auflösen von Zügen sowie das Bedienen von Zusatzanlagen der Bahnhöfe.

Rangierabteilungen bestehen aus einem oder mehreren Eisenbahnfahrzeugen, die in der Regel nur innerhalb der Bahnhöfe und Anschlußstellen bewegt werden. Die Höchstgeschwindigkeit für *Rangierfahrten* beträgt 20 km/h, für einzeln zu rangierende Triebfahrzeuge 40 km/h. Rangierfahrten führen keine Zugsignale und werden i. allg. auf ungesicherten Fahrwegen im *Sichtabstand* untereinander durchgeführt.

Richtungsgruppe. Ablaufende Wagen werden mittels Weichen in Sammelgleise für die jeweiligen Zugbildungsrichtungen geleitet und zum Halten gebracht.
Nachordnungs- bzw. *Stationsgruppe.* Für bestimmte Züge werden die in der Richtungsgruppe gesammelten Wagen gruppenweise für Unterwegsziele nachsortiert.
Ausfahrgruppe. Die Vorbereitung fertig gebildeter Züge auf die Ausfahrt umfaßt die wagentechnische Kontrolle, die Bespannung mit dem Triebfahrzeug, die Bremsprobe sowie das Anfertigen der schriftlichen Unterlagen für die Zugfahrt.
Der *Flachbahnhof* ist der überwiegend vorhandene Rangierbahnhoftyp mit vorwiegend waagerechtem Längsprofil (Neigung = 0 bis 1,5 ‰) in allen Gleisgruppen. Die Gefällekraft wird nur zum Auflösen der Züge und zum Nachordnen genutzt. Die Anordnung ist hintereinander und nebeneinander möglich.
Im *Gefällebahnhof* erfolgt die Mehrzahl der Rangierbewegungen durch die Schwerkraftwirkung. Alle oder einige Gleisgruppen haben mittleres Gefälle von ≧ 7 ‰. Abgebremste Wagen laufen dadurch von selbst wieder an. Gefällebahnhöfe erfordern viel Personal zum Abbremsen aller Wagen.
Die Gestaltung der *Ablaufanlage* beeinflußt wesentlich die Leistung eines Rangierbahnhofs. Die Höhe des Ablaufbergs muß gewährleisten, daß auch Wagen mit hohem Laufwiderstand bei ungünstiger Witterung (Gegenwind, Frost) das Ziel im Sammelgleis erreichen.
Automatische Ablaufstellwerke sind mit Speichereinrichtungen für die Laufziele der Abläufe

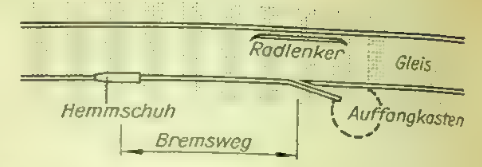


Abb. 16.1.6-4 Hemmschuh-Auswurfvorrichtung

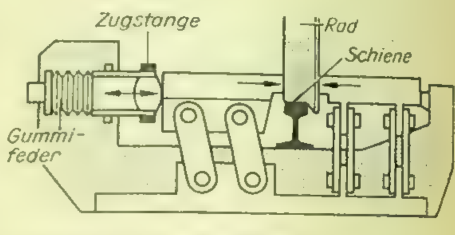


Abb. 16.1.6-5 Zweikraftbremse

ausgestattet. Sie sind für Bergleistungen ≧ 2500 Wagen/Tag vorzusehen.
Bremsmittel. Das Abbremsen der Fahrzeuge im Rangierdienst muß eine schonende Behandlung von Wagen und Ladegut sichern. Beim Umsetzen wird mit der Triebfahrzeug- bzw. der durchgehenden Druckluftbremse abgebremst. Beim Abstoßen und Ablaufen werden *Hemmschuhe* und ortsfeste Gleisbremsen eingesetzt, die von außen her die Geschwindigkeit vermindern. Bei der *Abstandsbremsung* wird eine gefährliche Annäherung der einander folgenden Abläufe vermieden. Durch die *Laufzielbremsung* wird der Wagen vor Hindernissen rechtzeitig zum Halten gebracht bzw. läuft auf stehende Wagen

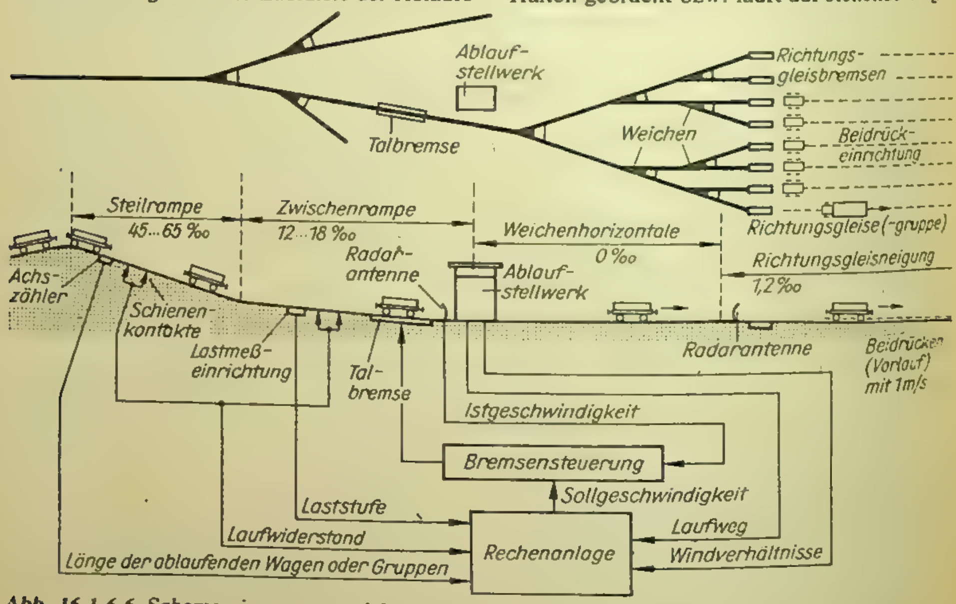


Abb. 16.1.6-6 Schema einer automatisierten Ablaufanlage

mit höchstens 1,5 m/s auf. Bei Zwischenbremsungen wird der Hemmschuh durch eine *Auswurfvorrichtung* vor dem Anhalten des Wagens von der Schiene entfernt (Abb. 16.1.6-4). Ortsfest eingebaute *Balkengleisbremsen* haben erheblich stärkere Wirkung als Hemmschuhe. Die Bremswirkung wird erzeugt durch von den Seiten an die Flanken der Radreifen gepreßte Bremsbalken mit pneumatischem, hydraulischem oder elektrischem Antrieb (Abb. 16.1.6-5). Kleine Balkengleisbremsen oder stationär eingebaute *Schraubenbremsen* in den Gleisen der Richtungsgruppe übernehmen auf modernen Rangierbahnhöfen die Laufzielbremsung in Verbindung mit *Beidrückeinrichtungen* zum Schließen von Lükken.

Automatisierung des Eisenbahnbetriebs. Zahlreiche Prozesse des Eisenbahnbetriebs sind hinsichtlich ihrer Häufigkeit, Regelmäßigkeit und Langfristigkeit für die Automatisierung mittels EDVA geeignet.

Die *automatische Zuglenkung* gewährleistet selbsttätig für die Züge das Erreichen der richtigen Gleise bei Bahnhöfen und Abzweigstellen. Die *automatische Zugsteuerung* regelt selbsttätig das Beschleunigen, Fahren und Bremsen von Triebfahrzeugen. Sie ist Voraussetzung für die *energieoptimale Fahrweise* der Züge.

Automatisierte Ablaufanlagen sind mit automatischen Ablaufstellwerken ausgestattet und ermöglichen eine automatische Geschwindigkeitsregelung durch Gleisbremsen mit Hilfe von Prozeßrechnern. Die weitere Automatisierung des Eisenbahnbetriebs ist weitgehend von der fortschreitenden Zentralisierung der Einzelprozesse abhängig (Abb. 16.1.6-6).

16.1.7. Umschlagtechnik

Umschlag ist ein Teilprozeß beim Gütertransport. Er umfaßt das Ver-, Ent- und Umladen von Gütern. Beim *direkten Umschlag* werden die Güter von einem Transportmittel unmittelbar in ein anderes verladen, z. B. vom Güterwagen in den Lastkraftwagen. Beim *indirekten Umschlag* erfolgt eine Zwischenlagerung des Gutes. In der Transportkette zwischen Erzeuger und Verbraucher tritt der Umschlag als jeder zweite Teilprozeß auf, der aufgrund seiner Arbeitsintensität und Kosten einen bedeutenden Anteil am Transportaufwand hat. Hinzu kommt die oft schwere körperliche Arbeit. Wesentliche Rationalisierungsmittel sind die Bildung von Ladeeinheiten, die Anwendung des Huckepackverkehrs und die Mechanisierung des Umschlags.

Ladeeinheit. Darunter ist die Gutmenge zu verstehen, die beim Umschlag als geschlossenes Ganzes behandelt werden kann. Sie entsteht durch das Zusammenfassen einzelner Stücke zu Paketen (*Paketierung*) oder Bündeln (*Bündelung*). Das Ziel ist, aus vielen Einzelstücken

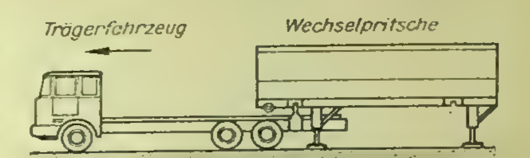


Abb. 16.1.7-1 Trägerfahrzeug, Wechselaufbau

wenige große Ladeeinheiten zu bilden, um die Zahl der Umschlagshandlungen einzuschränken. Besonders unterstützt wird das durch den Einsatz von Transporthilfsmitteln, wie Paletten, starren und flexiblen Containern, Wechselaufbau (Abb. 16.1.7-1) u. a. Transportbehältnissen, z. B. Netze. Die Ladeeinheiten sollen standardisiert sein und durch aufeinander abgestimmte äußere Abmessungen (Modulsystem) eine optimale Ausnutzung der Ladefläche und des Laderaums der Transportfahrzeuge ermöglichen.

Huckepackverkehr. Bei dieser Transportform wird ein Fahrzeug auf einem anderen transportiert. Mit geringen Umschlagmitteln, die sich oft auf Rampe und Überladebrücke beschränken, wird dabei die gesamte Fahrzeugladung in kurzer Zeit umgeschlagen. Nachteilig ist, daß außer dem Transportgut das Fahrwerk und meist auch der Antrieb des aufgeladenen Fahrzeugs mit befördert werden müssen. Die verbreitetsten Verfahren sind: Transport von Schienen- auf Schienenfahrzeugen, besonders auf Schmalspurstrecken (*Rollfahrzeugverkehr*), von Straßen- auf Schienenfahrzeugen, besonders in Westeuropa, in den USA und in Kanada (z. B. Flexi-Van, Rail-Route), von Schienen- auf Straßenfahrzeugen (*Straßenroller*) zwischen Bahnhof und Empfänger bzw. Versender des Güterwagens, von Straßen- oder Schienenfahrzeugen auf Schiffen (Roll-on-Roll-off-Verkehr, *Fährverkehr*) und von Schiffen auf Schiffen (z. B. LASH-Verkehr, vgl. 16.3.2.). Die Transportfahrzeuge sind meist der besonderen Form des Umschlags angepaßte Spezialfahrzeuge. Mit Einführung des Containerverkehrs haben Rollfahrzeug- und Straßenrollverkehr an Bedeutung verloren.

Umschlagmechanismen. Für den Umschlag gibt es eine Vielzahl technischer Mittel, die oft auch in anderen Bereichen, wie der Produktion, der Montage, dem innerbetrieblichen Transport und im Lager, Anwendung finden, angefangen von einfachen Hilfsmitteln, wie Brechstange, Rolle oder Schrotleiter bis zu automatischen Versandanlagen.

Aus der Gruppe der *Kleinhebezeuge* sind es vor allem Winden, mechanische bzw. hydraulische Heber und Flaschenzüge, die eine einfache Ortsveränderung, hauptsächlich nur in einer Richtung, gestatten. Sie werden manuell oder maschinell betrieben. Ihr Einsatz erfolgt beispielsweise zum Verholen roll- oder gleitbarer Schwergüter

oder zum Aufsetzen von Lasten auf Rollwagen.

Krane vgl. 10.6.2.

Flurförderzeuge sind Fahrzeuge für horizontale und vertikale Lastbewegung mit unterschiedlichen konstruktiven Merkmalen (vgl. 10.8.). Infolge ihrer vielseitigen Verwendbarkeit, auch im innerbetrieblichen Transport und Lager, sind sie die am weitesten verbreiteten Umschlagmechanismen für alle Arten von Gütern. Als handbetriebene Geräte werden *Stechkarre* und *Hubwagen* benutzt. Von den kraftgetriebenen Flurförderzeugen mit Elektro- oder Verbrennungsmotor werden Schlepper und Anhänger, Stapler, z. B. *Gabelstapler*, *Lader* und *Schrapper* eingesetzt. Durch eine Reihe von Anbaugeräten zum Aufnehmen und Manipulierung der Lasten, wie Transportzange, Faß-, Ballen- und Rollenklammer (vgl. Abb. 10.8.3-1), wird der Anwendungsbereich der Stapler erweitert.

Stetigförderer führen das Transportgut auf einem festgelegten Förderweg von der Aufgabe- zur Abgabestelle mit konstanter Geschwindigkeit oder im Takt (vgl. 10.3.). Sie sind für den Umschlag von Massen- und auch Stückgut geeignet und sind mobil oder ortsfest. Für Ladearbeiten werden am häufigsten Bandförderer (*Förderband*), pneumatische Stetigförderer mit

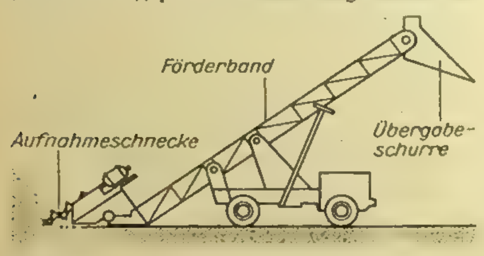


Abb. 16.1.7-2 Mobiler Schneckenlader

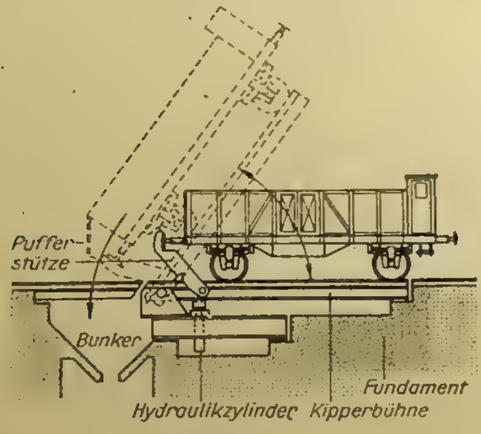


Abb. 16.1.7-3 Stirnkipper

Saug- oder Druckluft und stetig arbeitende *Lader* (Frässcheibenlader, Schneckenlader, Abb. 16.1.7-2) angewendet. Zum Umschlag von Erz, Asche, Kies u. a. werden vereinzelt hydraulische Förderer benutzt, bei denen das Fördergut mit Wasser eingeschwemmt wird, z. B. auf Erzschiffe.

Waggonkipper ermöglichen eine schnelle Entladung von Güterwagen und Straßenfahrzeuganhängern. Die Umschlagleistung kann bis zu 5000 t/h betragen. In der Kippvorrichtung wird das Fahrzeug so schräg gestellt, daß das Transportgut durch die geöffneten Bordwände in Bunker rutscht. Bei *Stirnkippern* (Abb. 16.1.7-3) wird die Kippbühne um eine vornliegende Querachse, bei *Kreisel-* oder *Rundkippern* um eine Längsachse gedreht (vgl. Abb. 10.10.0-1, Tafel 39).

Lastaufnahmemittel sind die Elemente, die die Verbindung zwischen Gut und Umschlagmittel herstellen. Neben Seilen und Ketten sind das *Lasthaken* (vgl. Abb. 10.5.2-1), *Traversen* (beim Containerumschlag *Spreader*), Zangen, *Lasthaftmagnete* für Stahlschrott, Stahlblöcke, Masseln u. a., *Vakuumlasthaftgeräte* für Betonteile, Steinzeug, Blöcke u. a. (vgl. 10.5.2.) und *Greifer* für Massengut (vgl. 10.5.3.).

16.1.8. Stadtschnellbahnen

Stadtschnellbahnen sind leistungsfähige Bahnarten für den öffentlichen Personennahverkehr. Man unterscheidet auf Dämmen, Stahlbeton- oder Stahlviadukten verlaufende *Hochbahnen*, in einem Tunnel unmittelbar unter der Straßenoberfläche geführte *Unterpflasterbahnen* und *Tiefbahnen* in großer Tiefe unter der Stadt. Einzelne Streckenteile können auch in Einschnitten oder in Geländehöhe angelegt sein. Stadtschnellbahnnetze sind weitmaschig; Städte und ihre Ballungsgebiete werden linienförmig erschlossen. Eine Ergänzung durch flächenerschließende Verkehrsmittel, wie Straßenbahn, Kraftomnibus oder Obus, ist erforderlich.

Eingesetzt werden Züge, die aus *Triebwagen* und antriebslosen *Steuerwagen* sowie *Beiwagen* gebildet werden. Züge können auch ausschließlich aus Triebwagen bestehen, wie z. B. bei der Moskauer Metro. Die Höchstgeschwindigkeit der Züge beträgt bei vorwiegend kurzen Stationsabständen ≈ 60 km/h, sonst 80 bis 120 km/h.

Der Verkehr wird vor allem mit Hilfe von zugbedienten selbsttätigen Signalen (Selbstblock) und Zugbeeinflussung durchgeführt, was eine sehr große Zugdichte bis herunter zu einer Zugfolgezeit von 1,5 min ermöglicht.

Zweischienenbahnen. *Stadt-* und *Vorortbahnen* sowie *S-Bahnen* werden zu speziellen Tarifen von der Eisenbahn betrieben und sind aus deren Vorortverkehr hervorgegangen. Sie fahren weit in das die Städte umgebende Ballungsgebiet

hinein, z. B. in Moskau bis 120 km. Häufig werden statt besonderer Fahrzeuge dafür geeignete normale Fernbahnwaggons und -lokomotiven eingesetzt. Mitunter benutzen Stadt- und Vorortbahn und Fernbahn gemeinsame Gleise, z. B. in Leipzig. Bei hohen Verkehrsanforderungen werden jedoch besondere Gleise und Fahrzeuge benötigt; häufig können dann auch Stromsystem, Stromzuführung, Signalanlagen und Fahrzeughöhe von denen der Fernbahn abweichen. Nur diese Betriebsform ist eigentlich als *S-Bahn* (Abk. für *Schnellbahn*) im engeren Sinne anzusprechen. In Städten mit mehreren Bahnhöfen ist man bestrebt, zwischen diesen eine – meist unterirdisch durch das Stadtzentrum geführte – *V-Bahn* (Abk. für *Verbindungsbahn*) anzulegen, z. B. in München.

Die *Metro*, meist nicht ganz zutreffend *Untergrundbahn*, in Berlin „*U-Bahn*", genannt, ist eine unabhängig von der Eisenbahn betriebene Stadtschnellbahn. Da sie nur bei sehr starkem Verkehr wirtschaftlich ist, führt sie nur selten über das Stadtgebiet hinaus. Zur Erzielung einer hohen Reisegeschwindigkeit werden bei neueren Metrozügen meist alle Achsen angetrieben. An Stelle der herkömmlichen reinen Stahlgußräder haben die Fahrzeuge einiger moderner Bahnen, z. B. in Paris, vorgespannte Gummikörper zwischen Reifen und Felge, was erhebliche Geräuschminderung bewirkt. Moderne Metrobetriebe verwenden ferner die Signalgebung im Führerstand, wobei die Befolgung der gegebenen Befehle kontrolliert wird und im Falle der Nichteinhaltung der Zug angehalten wird. Kombiniert man die Signalgebung im Führerstand mit einer automatischen Steuerung des Zuges, so läßt sich auch eine Zugfolgezeit unter 1,5 min erreichen, und dem Fahrer wird eine reine Kontrollfunktion zugewiesen.

Sonderbahnen sind Stadtschnellbahnen, bei denen die Fahrzeugräder nicht auf 2 Stahlschienen entlangrollen und von diesen geführt werden.

Leitschienenbahnen. Hier haben die Fahrzeuge außer den *Tragrädern*, die auf einer Betonfahrbahn rollen, *Führungs-* oder *Leiträder*, deren Achsen senkrecht stehen und die an stählernen *Leitschienen* entlanglaufen. Sehr schwierig ist bei diesem System die Weichenkonstruktion. Bei der Pariser Metro sind neben dem gummibereiften Tragrad ein Spurkranzrad und neben der Fahrbahn eine Stahlschiene angeordnet, die aber von den Spurkranzrädern normalerweise nicht berührt wird (Abb. 16.1.8-1). Nur im Bereich der wie bei Zweischienenbahnen angeordneten Weichen wird die Fahrbahn abgesenkt, so daß die Spurkranzräder auf die Stahlschiene aufsetzen.

Einschienenstandbahnen. Die bekannteste Form ist die nach dem schwedischen Industriellen Axel Lennard Wenner-Gren benannte *Alweg-Bahn*, die Bauelemente von Leitschienen- und Reiterbahn in sich vereinigt. Auf einer einige Meter hoch liegenden Stahlbetonfahrbahn in Form eines hochkant gestellten Balkens laufen *Trägräderpaare*, auf denen die Wagenlast ruht; *Leit-* oder *Führungsradpaare*, die auf beiden Seitenflächen des Fahrbalkens entlangrollen, verhindern ein Entgleisen der Fahrzeuge (Abb. 16.1.8-2).

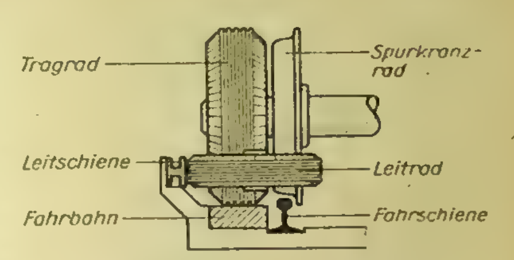


Abb. 16.1.8-1 Fahrbahn, Schienen und Räder der gummibereiften Züge der Pariser Metro

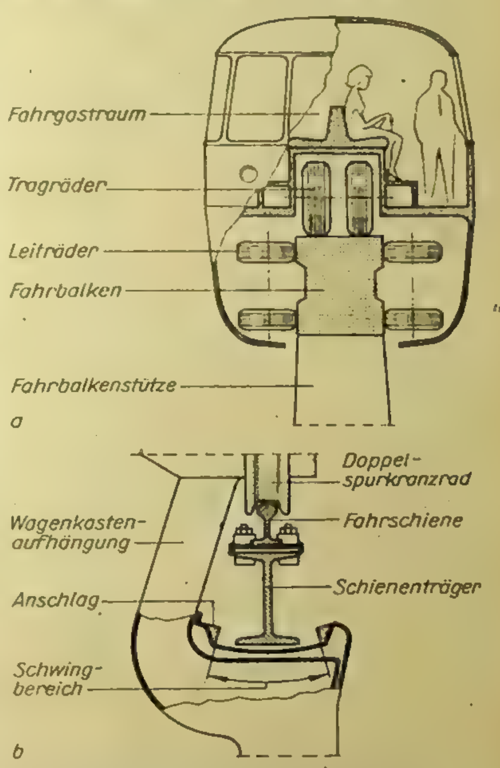


Abb. 16.1.8-2 a Fahrbahn und Fahrwerk der Alweg-Bahn, b Fahrzeugaufhängung der Wuppertaler Schwebebahn

Einschienenhängebahnen. Im Unterschied zu Einschienenstandbahnen befindet sich die Fahrbahn bzw. Schiene über den Fahrzeugen. Die *Tragräder* werden durch entsprechende Ausbil-

dung der Fahrbahn zwangsgeführt bzw. sind Doppelspurkranzräder. Die Fahrzeuge können sich quer zur Fahrtrichtung pendelförmig bewegen und so bei Kurvenfahrt entsprechend den wirkenden Kräften einstellen; Bewegungen nach oben sind nur so weit möglich, daß es nicht zum Entgleisen kommen kann. An Bahnsteigen verhindern *Leitschienen* das Schaukeln der Fahrzeuge. Die einzige als Stadtschnellbahn dieser Art betriebene Bahn ist die *Wuppertaler Schwebebahn*. Das gleiche System, allerdings mit Seilantrieb, wird bei einer Bergbahn in Dresden-Loschwitz angewendet.
In einigen Ländern, z. B. in der BRD, werden seit einiger Zeit Versuche mit *Kabinenbahnen* durchgeführt. Dabei steht eine automatische Betriebsabwicklung im Vordergrund. Kabinenbahnen, die dem öffentlichen Verkehr dienen, werden z. Z. nur in Dallas und Morgantown (USA) betrieben.

16.1.9. Straßenbahnen

Straßenbahnen verkehren im Unterschied zu Zweischienen-Stadtschnellbahnen meist im Bereich öffentlicher Straßen. Im allgemeinen wird auf Sicht gefahren. Signalanlagen werden nur an eingleisigen Strecken und besonderen Gefahrenstellen verwendet. Die Triebwagen werden mit Gleichstrom von meist 600 V betrieben, der von einem *Fahrdraht* über einen Stromabnehmer zugeführt wird. Die gegenüber Stadtschnellbahnen einfachere Bauausführung ermöglicht die Bildung engmaschigerer Netze. Als Fahrzeuge dienen vierachsige, früher auch zwei- und dreiachsige *Trieb-* und *Beiwagen* oder vier-, sechs- und achtachsige *Gelenkwagen*, die zu Zügen mit einer Länge bis zu 45 m, bei Überlandbahnen auch länger, zusammengestellt werden. Bei modernen Fahrzeugen werden die Hälfte bis 2 Drittel aller Achsen durch Elektromotoren angetrieben. Vereinzelt werden auch ausschließlich Triebwagen eingesetzt, z. B. in Dresden.
Die Höchstgeschwindigkeit moderner Wagen liegt bei 60 bis 70 km/h. Diese Wagen haben vorwiegend automatische Steuerung, bei der der Fahrer eine bestimmte Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsstufe vorwählt und das Schalten dann selbsttätig verläuft.
Bei Neubau oder Rekonstruktion von Straßenbahnanlagen wird meist die Form der *Schnellstraßenbahn* gewählt, z. B. in Schwerin, Großer Dreesch. Hierbei wird die Straßenbahn auf eigenem oder besonderem Bahnkörper horizontal, z. T. auch vertikal, vom übrigen Straßenverkehr getrennt. Höhengleiche Kreuzungen mit anderen Verkehrswegen sind möglich, müssen aber gesichert und zugunsten des Schnellstraßenbahnverkehrs gestaltet sein. An stark belasteten Verkehrsknotenpunkten in Stadtzentren treten starke Behinderungen zwischen Kraftfahrzeugverkehr und Straßenbahn auf; wo hier der Platz für einen besonderen Bahnkörper fehlt, strebt man in Form der *U-Straßenbahn* eine unterirdische Führung an.

16.1.10. Zahnradbahnen

Zahnradbahnen sind schienengebundene Bergbahnen zur Überwindung großer Steigungen, die von Reibungsbahnen nicht mehr bewältigt werden können. Je nach Zuglast und Streckenverhältnissen betragen die Grenzen der Reibungsbahnen mit Dampfbetrieb 80‰, mit elektrischem Betrieb 120‰. Noch größere Neigungen können von Schienenbahnen nur mit zusätzlichem Zahnradtrieb überwunden werden.
Zu diesem Zweck ist meist zwischen den beiden Fahrschienen eine Zahnstange verlegt. Für deren konstruktive Gestaltung haben sich 2 Hauptformen herausgebildet. Bei der *Leiterzahnstange* sind zwischen 2 parallelen Flacheisen in gleicher Teilung Bolzen angebracht (Abb. 16.1.10-1). Die *Stufenzahnstange* besteht aus einem ein- oder beiderseitig gezahnten Flacheisen, wobei die Zahnstangen vertikal oder horizontal angeordnet sein können (Abb. 16.1.10-2). Bei vertikalem Zahn-

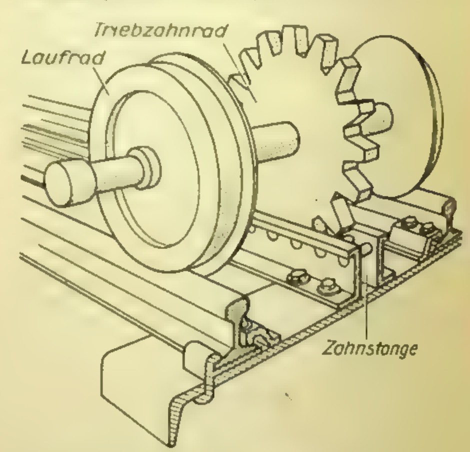


Abb. 16.1.10-1 Leiterzahnstange

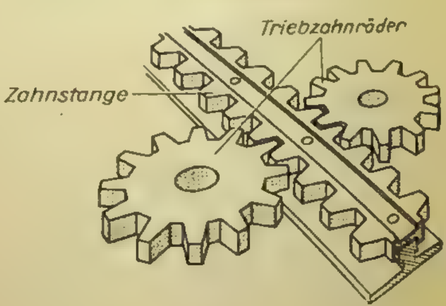


Abb. 16.1.10-2 Doppel-Stufenzahnstange

radtrieb können Steigungen bis 250‰, bei horizontalem bis 500‰ überwunden werden, wobei zur Erhöhung der möglichen Zuglast und Steigung Doppelzahnstangen, also beiderseits gezahnte Stangen, verwendet werden. In die Zahnstange greifen ein oder mehrere Zahnräder des Triebfahrzeugs ein, die durch den Kurbeltrieb angetrieben werden. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 6 bis 18 km/h. Die Personenwagen sind der Steigung entsprechend schräg oder stufenförmig ausgebildet. Das Triebfahrzeug befindet sich aus Sicherheitsgründen stets auf der Talseite des Zuges. Infolge der hohen mechanischen Beanspruchung von Zahnstange und -rädern sind Materialverschleiß und Wartungsaufwand größer als bei Reibungsbahnen. Neben reinen Zahnradbahnen gibt es gemischte Reibungs- und Zahnradbahnen, die nur Steilstrecken mit Zahnradtriebwerk, z. T. unterstützt durch das Reibungstriebwerk, befahren. Bekannte europäische Zahnradbahnen mit vertikalem Antrieb sind die Zugspitzbahn, mit horizontalem Antrieb die Pilatusbahn (Schweiz), die mit 480‰ zugleich die steilste ist.

16.1.11. Seilbahnen

Unter dem Begriff *Seilbahnen* werden alle Verkehrs- und Fördermittel zum Transport von Personen und Gütern zusammengefaßt, bei denen ein Drahtseil als Zug- oder Tragmittel benutzt wird.

Standseilbahnen sind meist kurze Bergbahnen, die Steigerung bis 750‰ überwinden können. Die 2 auf einem Gleis durch Seilzug gegeneinander bewegten Wagen haben in der Mitte zwischen Berg- und Talstation eine Ausweichstelle, an der sich die beiden Wagen begegnen. Der Antrieb erfolgt in der Bergstation mittels einer Seilrolle. Während der bergwärts fahrende Wagen die schräge Strecke hochgezogen wird, rollt der am anderen Seilende befestigte Wagen zur Talstation. Der größte Teil der Antriebsenergie wird durch die Schwerkraft des talwärts fahrenden Wagens aufgebracht. Nur zur Überwindung von Fahrwiderständen und zum Ausgleich unterschiedlicher Belastungen ist eine geringe zusätzliche Antriebsenergie erforderlich. Statt eines 2. Fahrzeugs können auch gleitende Gewichte verwendet werden. Die Spurweite beträgt i. allg. 1000 mm. Die Fahrzeuge sind meist schräg oder stufenförmig entsprechend der Neigung der Strecke ausgebildet und können bis zu 140 Personen fassen. Die Fahrgeschwindigkeit kann bis 36 km/h betragen.

Bei Steigungen >400‰ werden besondere Fördergestelle eingesetzt, wie z. B. bei *Schrägaufzügen* zur Beschickung von Hochöfen. Unter *Bremsbergförderung* wird eine reine Talförderung verstanden, da die Vortriebskraft abgebremst werden muß.

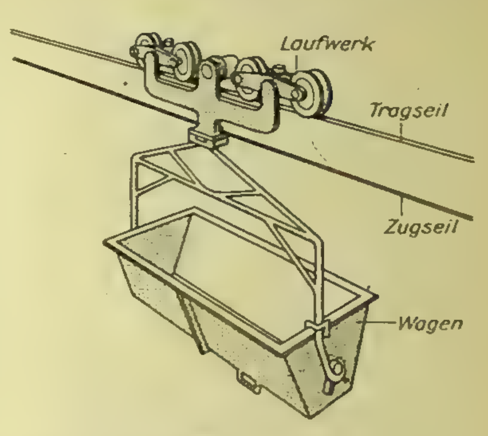


Abb. 16.1.11-1 Wagen einer Güterschwebeseilbahn (Zweiseilbahn)

Schwebe- oder **Drahtseilbahnen** sind Seilbahnen, bei denen die Fahrzeuge an Drahtseilen hängen. Sie dienen der Überwindung von unwegsamem, zerklüftetem Gelände und von großen Höhenunterschieden. Bei Zweiseilbahnen sind Fahrbahn- und Zugseil getrennt. Bei *Einseilbahnen* ist das in einer Richtung umlaufende Seil zugleich Trag- und Zugorgan. Ohne Zwischenstationen lassen sich bis 3000 m Streckenlänge und bis 1500 m Höhenunterschied überwinden. Bei größeren Distanzen und Höhenunterschieden wird die Bahn in einzelne voneinander unabhängige Teilstrecken unterteilt.

Personenschwebeseilbahnen. Nach der Art des Lastaufnahmemittels werden *Kabinenbahnen* für bis 24 Personen und *Sessellifts* mit hintereinander laufenden Hängesesseln für 1 bis 2 Personen unterschieden.

Güterschwebeseilbahnen dienen dem Transport von Massengütern von der Förder- zur Umschlagstelle und als innerbetriebliche Förderbahn für Kohle, Erz, Steine, Abraum u. a. in Industriebetrieben. Die Wagen können meist selbsttätig kippen (Abb. 16.1.11-1). Bei annähernd horizontaler Streckenführung werden heute meist Gurtbandförderer eingesetzt.

Schwebeseilbahnen sind entweder für Pendelbetrieb oder für Umlaufbetrieb eingerichtet.

Betriebsarten. Im *Pendelbetrieb* werden meist 2 Tragseile benutzt, die am oberen Bahnende verankert sind und deren gleichmäßige Seilspannung durch Gegengewichte in der Talstation erreicht wird. Die beiden Wagen sind an einem Zugseil befestigt, das offen oder geschlossen ist (Abb. 16.1.11-2). Das Zugseil wird in der Bergstation in wechselnder Richtung angetrieben, so daß die Fahrzeuge stets auf der gleichen Streckenseite hin- und herlaufen, z. B. Fichtelberg-Schwebebahn.

Umlaufbetrieb kann bei Zweiseilbahnen durchgeführt werden. Das Zugseil ist endlos und wird in der einen Station immer in der *gleichen* Richtung angetrieben, so daß die Fahrzeuge auf jeder der beiden Fahrbahnen nur in *einer* Richtung bewegt werden. Bei Einfahrt in die Station werden die Wagen selbsttätig vom Zugseil gelöst und auf *Hängebahnschleifen* durch den Bereich der Station von Hand, durch Gefälle oder Kettenantrieb geführt. An- und Abkuppeln erfolgen automatisch.

Trag- und Zugseile. Tragseile sind starkdrähtige Spiral- oder verschlossene Formdrahtseile, die bei Personenbahnen mit fünffacher Sicherheit bemessen sind. Als Zugseile werden Litzenseile mit achtfacher Sicherheit verwendet (vgl. 10.1.1.). Um die Sicherheit gegen Absturz zu gewährleisten, werden die Tragseile laufend gewartet. Personenschwebebahnen haben für den Notfall eine starke, in das Laufwerk eingebaute *Federzangenbremse*, die von der Kabine aus bedient bzw. durch Zugseilriß selbsttätig ausgelöst wird.

Sonderbauarten von Seilbahnen. *Seilkletterbahnen* haben kein Zugseil. Die Fahrzeuge werden mit einem (Kletter-) Antrieb durch den Reibschluß zwischen Tragseil und Laufrollen vorwärtsbewegt. *Kreisförderer* dienen dem Transport von Montageteilen, Packmitteln u. a. in der Produktion, teilweise über mehrere Etagen und durch Bäder, Spritzkammern, Trockenöfen u. a. Fertigungsstufen. Zur Gruppe der *Schleppseilanlagen* zählen die *Seiltreidelanlagen* für die Fortbewegung von Schiffen in Schleusen, die Seilrangieranlagen (*Spille*) zum Verschieben von Eisenbahnwagen, *Skilifts*, deren angetriebene Zugseile mit Bügeln versehen sind, an denen sich die Fahrgäste auf den Skiern gleitend den Hang hinaufziehen lassen, sowie Anlagen des Wasserskisports. Im weiteren Sinne zählen zu den Seilbahnen auch Kabelkrane (vgl. 10.6.2.) und -bagger.

16.2. Kraftfahrzeugtechnik — Kraftverkehr

16.2.1. Kraftfahrzeuge

Kraftfahrzeuge sind durch Maschinenkraft angetriebene, nicht an Schienen gebundene Straßen- und Geländefahrzeuge mit 2 oder mehr Rädern oder Gleisketten. Sie werden zum Transport von Personen, Gütern und Arbeitsgeräten sowie als Zugfahrzeuge für Anhänger und Arbeitsgeräte benutzt. Bei einem Kraftfahrzeug werden alle zum Antrieb, zum Bremsen und zur Spurhaltung benötigten Kräfte über die Räder oder Gleisketten als Reibungskräfte auf die Fahrbahn übertragen.

Zweiradfahrzeuge. Beim *Motorfahrrad* (*Mofa*) ist der Motor entweder über dem Vorderrad angeordnet und treibt dieses mittels Reibrolle an, oder er befindet sich am Tretlager bzw. neben dem Hinterrad, das dann mittels Kette angetrieben wird. Verwendet werden einfache Zweitakt-Ottomotoren mit einem Hubraum bis zu 50 cm^3.

Das *Moped* unterscheidet sich vom Mofa dadurch, daß es i. allg. mit einem Wechselgetriebe zur Drehmomentwandlung ausgerüstet ist. Wenn das Mofa notfalls noch über eine größere Entfernung mit der Tretkurbel betrieben werden kann, so ist das beim Moped kaum noch möglich. Aus diesem Grunde wurde das Mokick entwik-

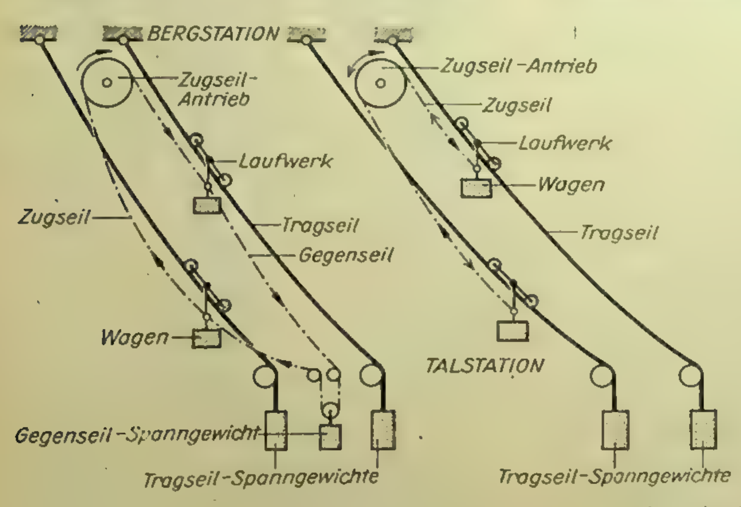


Abb. 16.1.11-2 Schwebeseilbahn, links mit geschlossenem, rechts mit offenem Zugseil (Pendelbetrieb)

kelt, bei dem der Motor nicht mehr mit der Tretkurbel, sondern mittels Kickstarter in Betrieb gesetzt wird. *Mokicks* sind die z. Z. am meisten gebauten Kleinkrafträder (z. B. SIMSON S 50). Sie werden von einem Zweitakt-Ottomotor bis 75 cm³ Hubraum angetrieben, haben 2 Sitze oder 1 Sitzbank und erreichen eine Höchstgeschwindigkeit von ≈ 75 km/h. Vorder- und Hinterrad sind wie beim Motorrad federnd gegen den Rahmen abgestützt. Motoreinbau und Antrieb des Hinterrads entsprechen ebenfalls denen beim Motorrad.

Kraft- oder *Motorräder* entwickeln von allen Zweiradfahrzeugen die größte Geschwindigkeit. Der Motor ist ein über Lamellen vom Fahrtwind gekühlter Otto-Zweitaktmotor. Bis 250 cm³ ist es ein Einzylindermotor, der meist mit stehendem Zylinder ausgeführt wird. Bei einem Hubraum über 250 cm³ gibt es auch Zweizylindermotoren als *Boxer-* (gegenüberliegend), *Twin-* (nebeneinanderstehend) und *V-Motor* (V-förmige Zylinderanordnung). Bei schweren Krafträdern mit über 1 000 cm³ Hubraum gibt es auch Vier- und Sechszylindermotoren. Die Kraftübertragung erfolgt über eine ein- und ausrückbare Reibkupplung und das Wechselgetriebe auf die *Rollenkette*, die über das *Tellerrad* (Zahnrad) das Hinterrad antreibt. Der *Rahmen* wird aus nahtlos gezogenem Stahlrohr oder profilgepreßtem Stahlblech gefertigt. In ihm wird der Motor mit dem angeblockten Getriebe eingebaut. Die Räder sind entweder über eine *Teleskop-* oder *Schwinghebelgabel* mit hydraulischer Schwingungsdämpfung gegen den Rahmen abgestützt.

Motorroller unterscheiden sich vom Kraftrad vor allem durch den kleineren Raddurchmesser und die Durchstiegsfreiheit zwischen Lenksäule und Fahrersitz. Der Hubraum von Motorrollern beträgt i. allg. zwischen 125 und 250 cm³.

Dreiradfahrzeuge. Kraftrad und Motorroller können auch mit *Seitenwagen* (*Beiwagen*) als „Gespann" gefahren werden. Ihre Bedeutung als individuelles Transportmittel ging mit zunehmender PKW-Produktion zurück, weil insbesondere Wetterschutz und Komfort bei Gespannfahrzeugen ungenügend sind. In ostasiatischen Ländern werden motorisierte Dreiräder auch als *Rikscha* (Taxi) eingesetzt. Krafträder mit Seitenwagen haben noch Bedeutung für sportliche und militärische Zwecke.

Personenkraftwagen (PKW) sind Straßenfahrzeuge, die vorwiegend für den Transport von 2 bis 5 (max. 7) Personen und deren Gepäck konstruiert sind. Bis auf wenige Ausnahmen werden sie durch Verbrennungsmotoren (Otto- oder Dieselmotor) angetrieben. Für die Einteilung nach der Baugröße gelten näherungsweise die in Tab. 16.2.1-1 angeführten Kriterien. Klein- und Mittelklassewagen haben vorzugsweise Frontantrieb, bei größeren PKW werden meist die Hinterräder angetrieben. Spezialausführungen für militärische Zwecke sind durch Allradantrieb und teilweise auch Allradlenkung geländegängig.

Auch schwimmfähige Ausführungen werden hergestellt.

Kraftomnibusse (KOM), auch *Autobusse* genannt, werden nach der Anzahl der Sitzplätze in *Kleinbus* (bis 16 Sitzplätze), *Mittelbus* (bis 35 Plätze) und *Großbus* (mehr als 35 Plätze) unterteilt. Sie werden im Werk-, Linien- und Reiseverkehr eingesetzt. Für mehrtägige Reisen gibt es KOM mit Liegesitzen bzw. *Hotelbusse* (*Rotel*) mit Schlafgelegenheit. Im städtischen Nahverkehr haben sich KOM mit wenig Sitzplätzen und viel Stehplätzen bewährt, da die durchschnittliche Fahrdauer für den Benutzer nur ≈ 10 min beträgt. Durch Kompaktbauweise, wie *Doppelstockbus* und *Gelenkbus*, können bis zu 200 Personen rationell befördert werden. Der KOM stellt im städtischen Nahverkehr im Gegensatz zur Straßenbahn (sofern diese keine eigene, straßenunabhängige Trasse hat) kein Verkehrshindernis dar, weil er sich in die Verkehrsströme einordnen kann und seine Haltestellen nicht in Fahrbahnmitte haben muß. KOM werden meist durch Dieselmotoren angetrieben und weisen Konstruktionstendenzen auf, die denen der PKW verwandt sind, um möglichst großen Fahrkomfort und Sicherheit zu gewährleisten. Im städtischen Nahverkehr werden auch Busse mit Elektroantrieb, bisher meist Oberleitungsbusse (*Obusse*), eingesetzt (vgl. S. 595).

Güterkraftwagen (GKW) (physikalisch falsche Benennung: *Lastkraftwagen*, LKW) sind für den Transport auf öffentlichen Straßen für eine Nutzmasse zwischen 1 und 16 t, mit Anhänger bis 38 t (angestrebte internationale Vereinheitlichung 45 t), für Sonderzwecke, z. B. Baustellen, Erzgruben, bis 350 t ausgelegt. Außer GKW-Zügen aus Motorwagen und Anhänger sind *Sattelzüge* aus Zugmaschine und Sattelauflieger rationell einsetzbar (Weiterverwendbarkeit der Zugmaschine während der Be- oder Entladung des Aufliegers). GKW haben häufig dem Verwendungszweck angepaßte Aufbauten, z. B. Pritsche, Kippmulde, Koffer für den Transport von Kühlgut, Möbeln, Textilien, Lebensmitteln, technischen Erzeugnissen u. a., Großraumbehälter für Kraftstoffe, Chemikalien, Zement, Futtermittel usw., Einrichtungen für das

Tab. 16.2.1-1 *Klasseneinteilung von PKW*

Einteilung	Länge in m	Eigenmasse in kg	Hubraum des Motors: Ottomotor in dm³	Dieselmotor in dm³
Kleinwagen	< 4	< 800	< 1,2	< 1,5
Mittelklasse	4 bis 4,5	800 bis 1 200	1,2 bis 2,5	1,5 bis 3
große PKW	> 4,5	> 1 200	> 2,5	> 3

Gesundheitswesen oder für kommunale Zwecke, wie Müll-, Kadavertransport usw., spezielle Einrichtungen für die Landwirtschaft und weitere Wirtschaftszweige. Sehr große Bedeutung hat der GKW in geländegängigen Spezialausführungen für militärische Zwecke.
GKW werden meist mit Dieselmotoren angetrieben, wobei sich die Motorleistung einer Kenngröße von 10 kW/t Gesamtmasse nähert. Im Güternahverkehr werden auch PKW-ähnliche Kfz (*Kombi-* und *Lieferwagen* sowie *Schnelltransporter*) eingesetzt. Diese haben teilweise Frontantrieb und sind noch überwiegend mit Ottomotor ausgerüstet, jedoch ist ein Trend zum Dieselmotor vorhanden. GKW mit Elektroantrieb haben bisher nur innerbetriebliche oder lokal begrenzte Bedeutung.
Der Antrieb erfolgt normalerweise über die Hinterachse, jedoch gibt es auch Mehrachsausführungen mit Mehrachs- oder Allradantrieb und Zweiachs- oder Allradlenkung.

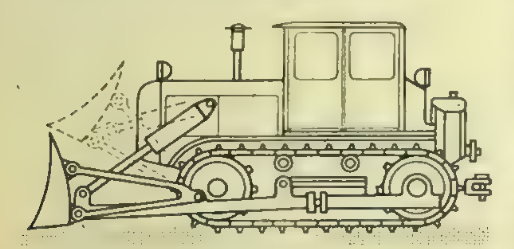


Abb. 16.2.1-2 Planierraupe

Zugmaschinen sind meist von einem GKW-Typ abgeleitete Spezialfahrzeuge zum Ziehen von Anhängern für besonders schwere Güter, z. B. Bauplatten, Wohnraumzellen. Mit ihnen werden vielfach auch solche Güter befördert, die infolge besonders großer Abmessungen und Masse nur mit Sondergenehmigung auf öffentlichen Straßen transportiert werden dürfen. Zugmaschinen haben Getriebe und Achsantriebe, die speziell für große Drehmomente bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten konstruiert sind. In der Land-, Forst- und Bauwirtschaft werden als Zugmittel auch *Ein-* und *Zweiachs-Radschlepper* sowie *Gleiskettenschlepper* (*Traktoren*) eingesetzt. Eine Bauart, die nicht zum Ziehen, sondern zum Schieben verwendet wird, ist die mit Gleisketten und Planierschild ausgerüstete *Planierraupe* (Abb. 16.2.1-2).
Arbeitskraftfahrzeuge stellen eine Kombination von Transportmittel und Arbeitsmaschine dar. Der Antrieb der Arbeitsmaschinen erfolgt meist über eine Zapfwelle (Gelenkwelle, vgl. Abb. 9.1.4-2), selten über Spill (Forstwirtschaft). Beispiele sind Kehrkraftwagen mit Staubsauger, Sprengwagen, Müllpreßwagen, Betonmischer, Fäkalienfahrzeuge, Schneefräsen, Kranwagen, Futtertransportfahrzeuge mit Mähbalken, Abschleppwagen, Werkstattwagen, Funk- und Fernsehübertragungswagen, Skipistenplanierer u. a.
Sonderkraftfahrzeuge sind der Art nach Kraftwagen, dienen aber besonderen Verwendungszwecken und haben diesen speziell angepaßte Aufbauten bzw. Karosserien. Beispiele sind Mannschaftstransportwagen bewaffneter Organe, Feuerwehrfahrzeuge, Militärfahrzeuge, Sportfahrzeuge (Rennwagen). Teilweise sind sie Arbeitskraftfahrzeuge mit der Möglichkeit zum Transport einer größeren Anzahl Personen.

16.2.2. Kraftfahrzeugantriebe

Verbrennungsmotoren werden im Kraftfahrzeug vorwiegend als *Hubkolbenmotor* (HKM), seltener als *Rotationskolbenmotor* (z. B. Kreiskolbenmotor, KKM) oder in einer anderen Bauart (z. B. als Gasturbine, Dampfmaschine, Heißluftmotor) eingesetzt.
Am weitesten verbreitet sind Viertakt-Ottomotoren; Viertakt-Dieselmotoren dominieren in GKW und Omnibussen und gewinnen im PKW an Bedeutung; Zweitakt-Ottomotoren werden in Krafträdern und kleinen PKW verwendet (vgl. 2.6.2.).
Das *Zweitaktverfahren* hat den Vorteil, daß jeder zweite Takt (Kolbenbewegung zwischen den durch den Kurbeltrieb bedingten Totpunkten) ein Arbeitstakt ist, dagegen gegenüber dem *Viertaktverfahren* (bei dem nur jeder vierte Takt ein Arbeitstakt ist) den Nachteil, daß der Erfolg des Ladungswechsels kleiner ist. Deshalb ist die auf den Hubraum bezogene Leistung des Zweitaktmotors nur geringfügig größer als die des Viertaktmotors.
Bei der Energieumwandlung muß ein Teil der Energie (30 bis 40%) in Form von Wärme dem Prozeß entzogen werden, weil die zur Verfügung stehenden Werk- und Schmierstoffe nur eine begrenzte Wärmebelastung ertragen. Bei der *Luftkühlung* wird die Wärme aus dem Zylinder über Kühlrippen an die Umgebungsluft übertragen, wobei der Luftstrom in Form von „Fahrtwind" oder durch ein mechanisch angetriebenes Gebläse zustandekommt; bei *Flüssigkeitskühlung* sind die Brennraumwandungen von einer Kühlflüssigkeit (z. B. Wasser, Dieselkraftstoff, Wasser-Frostschutzmittel-Gemische, Glykol) umgeben. Die von der Kühlflüssigkeit aufgenommene Wärme wird über einen Kühler an die Umgebungsluft abgegeben. Der notwendige Flüssigkeitsumlauf wird bei kleinen Motoren durch den Dichteunterschied zwischen kaltem und warmem Wasser (*Thermosyphonkühlung*), bei großen Motoren durch eine Pumpe (*Pumpenumlaufkühlung*) bewirkt. Der notwendige Luftstrom wird – sofern der Fahrtwind nicht ausreicht – durch einen thermostatgeschalteten Lüfter erzeugt.

Eine Entwicklungsrichtung auf dem Gebiet der Kraftfahrzeug-Verbrennungsmotoren hat zum Ziel, die Vorzüge von Otto- und Dieselmotor in einem Motor möglichst ohne deren Nachteile zu vereinigen. Beispiele dafür sind der *Mitteldruckmotor* (Spitzendruckwerte befinden sich etwa in der Mitte zwischen denen der Otto- und Dieselmotoren) oder Motoren mit *Ladungsschichtung*. Von militärischer Bedeutung ist ein Motor, der ohne Umbauten alle Kraftstoffe vom Leichtbenzin bis zum Schmieröl verwerten kann (*Vielstoffmotor*).

Gasturbinen (vgl. 2.6.3.) erschienen nach ihrer vorteilhaften Verwendung im Flugzeug auch für den Kfz-Antrieb geeignet. Besonders die Eigenschaft der Gasturbine, ohne hin- und hergehender Teile auszukommen, ist mit Rücksicht auf den Fahrkomfort erwünscht. Allerdings ist bei so kleinen Ausführungen, wie sie für PKW nötig sind, der Wirkungsgrad nicht so gut wie beim Hubkolbenmotor. Vorteile sind einfacher Aufbau bei der Einwellenturbine (vgl. Abb. 2.6.3-7), sehr günstiger Drehmomentverlauf bei der Zweiwellenturbine, kleiner Raumbedarf bei Ausführungen ohne Wärmetauscher, günstiges Verhältnis Leistung/Masse, Verwendungsmöglichkeit billigen Kraftstoffs und geringere Schadstoffemissionen. Nachteilig wirken die hohen Gastemperaturen, die Turbinenschaufeln aus Sonderwerkstoffen und rotierende Wärmetauscher erfordern, die großen Drehzahlen (1 000 U/s und mehr), die Reduziergetriebe benötigen, und die notwendige Geräuschdämmung am Lufteintritt und Abgasaustritt. Infolge dieser Zusatzaufwendungen wird der Gasturbinenantrieb teuer. Weder im PKW noch im GKW, bei dem für die Gasturbine günstigere Bedingungen gegeben sind, kam es bisher zu einer nennenswerten Nutzung. Für militärische Zwecke (z. B. einige Panzertypen) wird die Gasturbine allerdings eingesetzt. Hier sind das Kaltstartvermögen und die schnelle Betriebsbereitschaft so bedeutsam, daß der große Kraftstoffverbrauch in Kauf genommen wird. Auch für Schiffsantriebe werden Gasturbinen verwendet (vgl. 16.3.1.).

Elektromotoren dienen nicht nur zum Antrieb spurgebundener Fahrzeuge, auch Straßenfahrzeuge werden – allerdings zu einem sehr kleinen Teil – elektrisch angetrieben. Während bei spurgebundenen Fahrzeugen die Versorgung aus dem Netz möglich ist, müssen nichtspurgebundene aus einem Energiespeicher (Batterie) versorgt werden (Tafel 63). Bisher ist es nicht gelungen, Batterien zu entwickeln, die sich bezüglich Masse und Speicherfähigkeit mit einem Speicher für flüssige Kraftstoffe (Kraftstofftank) auch nur annähernd messen können. *Elektrospeicherfahrzeuge* haben einen Fahrbereich (Aktionsradius) von 30 bis 100 km und sind deshalb gegenwärtig gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nur im Nahverkehr konkurrenzfähig. Sie werden deshalb für den innerbetrieblichen Transport (Elektrokarren, Stapler) oder für die innerstädtische Versorgung eingesetzt.

Der in der Summe seiner Eigenschaften bisher günstigste Elektroenergiespeicher ist die Bleibatterie. So lange jedoch nicht bessere Elektroenergiespeicher verfügbar sind, können die Vorzüge des Elektromotors (Geräuscharmut, günstige Drehmomentcharakteristik, die Schadstoffe werden nicht im Straßenverkehr emittiert, sondern über das Kraftwerk auf die Umgebung verteilt) nicht allgemein für Kraftfahrzeuge genutzt werden. Auch die seit Jahrzehnten bekannten Brennstoffelemente (vgl. 2.1.6.) konnten bisher nicht auf einen für Kraftfahrzeuge brauchbaren Stand gebracht werden.

Der *Gyrobus* ist eine spezielle Form eines Elektrospeicherfahrzeugs. Als Energiespeicher dient ein Schwungrad. An Haltestellen wird über besondere Masten und Stromabnehmer auf dem Dach des Gyrobusses Energie einem Elektromotor zugeführt. Dieser bringt ein Schwungrad auf eine große Drehzahl, wodurch die elektrische Energie in kinetische umgeformt wird. Für den Fahrbetrieb wird der das Schwungrad antreibende Elektromotor als Generator geschaltet und formt die kinetische Energie des Schwungrads wieder in Elektroenergie um, die dem Antriebsmotor zugeführt wird. Der Haltestellenabstand kann bis zu 10 km betragen.

Der *Oberleitungsomnibus* (Obus) erhält die Energie durch Stromabnehmer aus einem zweipoligen Fahrleitungsnetz. Dadurch ist er zwar liniengebunden, kann aber trotzdem Verkehrshindernissen bis zu 4,5 m nach links oder rechts von der Fahrleitungsmitte ausweichen.

16.2.3. Hauptbaugruppen von Kraftwagen

Fahrgestell. Es besteht aus dem *Fahrwerk* (Rahmen, Achsen, Radaufhängungen, Räder, Federung, Schwingungsdämpfer, Bremsanlage und Lenkung) und dem darauf montierten *Triebwerk* (Motor, Kupplung, Getriebe, Gelenkwellen). Während bei GKW die Rahmenbauweise (Abb. 16.2.3-1) den Normalfall darstellt, ist sie aus dem PKW- und Omnibusbau nahezu verschwunden. Dort werden die tragenden Profile mit der Karosserie zu einem „*selbsttragenden*" Aufbau verschweißt. Der Rahmen ist das tragende Element des Fahrzeugs. Er besteht meist aus 2 Längsträgern (U-, Kasten- oder Rohrprofil), die mit Quertraversen und teilweise Diagonalstreben verschweißt sind. Seltener besteht der Rahmen aus einem Mittelträger (*Zentralrohrrahmen*) mit Quertraversen. Bei der *Rahmen-Boden-Anlage* wird auch das Bodenblech mit dem Rahmen verschweißt. Die selbsttragende Ausführung der Karosserie erfordert etwas we-

niger Werkstoff und ist in der Herstellung billiger, jedoch bei Reparaturen meist teurer. Bei GKW ist die Rahmenbauweise zweckmäßig, um die vielfältigen Aufbauvarianten realisieren zu können. Bei Traktoren wird teilweise auf einen Rahmen verzichtet, und die sehr steif ausgeführten Triebwerkteile übernehmen auch die Tragfunktion.

Achsen im Sinne einer selbständigen Baugruppe gibt es nicht mehr bei allen Kraftfahrzeugen. Bei PKW sind normalerweise die Vorderräder und oft auch die Hinterräder einzeln aufgehängt. Bei Omnibussen ist vorn die Starrachse auch schon weitgehend durch die *Einzelradaufhängung* ersetzt. Nur bei GKW werden normalerweise alle Achsen als *Starrachsen* ausgeführt. Bei Geländewagen dominiert dagegen die Einzelradaufhängung. Angetriebene Starrachsen bestehen aus einem Achsgehäuse (Achsbrücke), in dem sich ein Ausgleichgetriebe und die anzutreibenden Halbachsen befinden. Bei Einzelradaufhängung sind die Halbachsen als Gelenkwelle ausgeführt. Diese Bauart ist zwar teuer, gibt aber größere aktive Sicherheit.

Räder werden für Einspurfahrzeuge und teilweise auch Sportwagen als *Speichenräder*, für alle anderen Kraftfahrzeuge als *Scheibenräder* ausgeführt. Die *Felge* nimmt Schlauch und Reifen (bei schlauchloser Ausführung nur den Reifen) auf (Abb. 16.2.3-2). Bei Trommelbremsen ist die Trommel mit dem Rad verbunden, bei Scheibenbremsen z. T. die Bremsscheibe.

Reifen sind das elastische Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn und tragen maßgebend zur aktiven Sicherheit eines Kfz bei. Die Entwicklung geht zu großvolumigeren Reifen, wobei der dynamische Reifenradius erhalten bleibt, aber die Reifenbreite zunimmt. Das tragende Gerüst, die *Karkasse*, wird immer weniger aus diagonal gewebten Textilfäden (*Diagonalreifen*), sondern immer mehr aus einem Stahlkordgürtel hergestellt (*Gürtel-* oder *Radialreifen*). Dadurch wird der Protektor weniger Verformungen unterworfen und der Abrieb kleiner. Die notwendige Reifenverformbarkeit wird durch weiche Seitenwände erreicht. Der steife Gürtel hat auf Kleinpflaster Dröhngeräusche zur Folge.

Die Stahlkordkarkasse besteht normalerweise aus einer Lage mit rechtwinklig zur Umfangs-

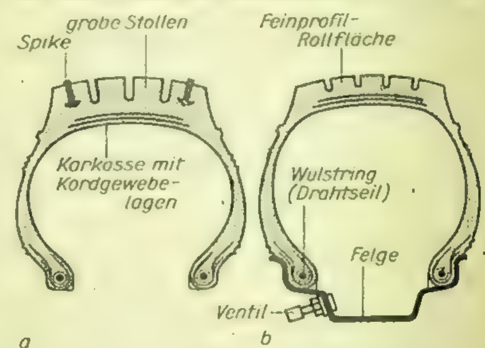


Abb. 16.2.3-2 *a Matsch-und-Schnee-(M + S-)-Reifen mit Spikes, **b** schlauchloser Feinprofilreifen*

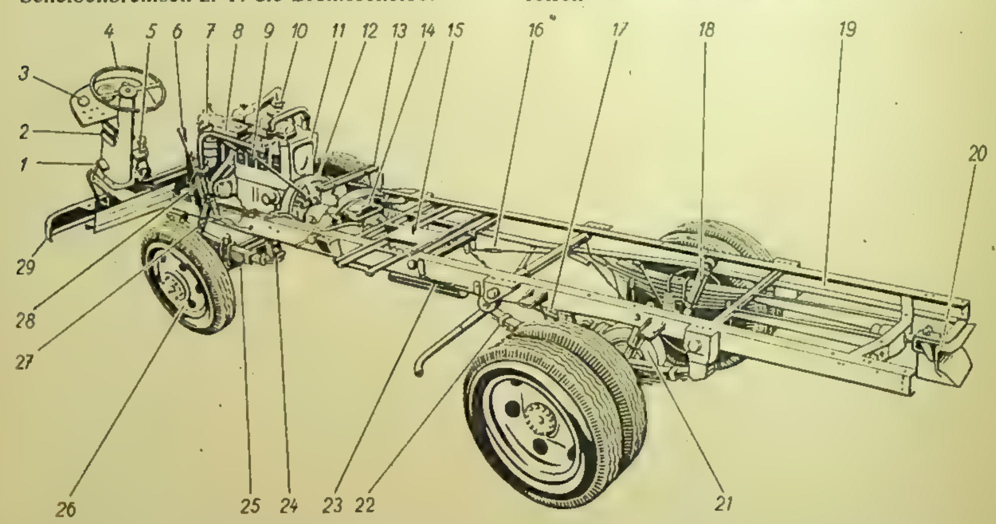
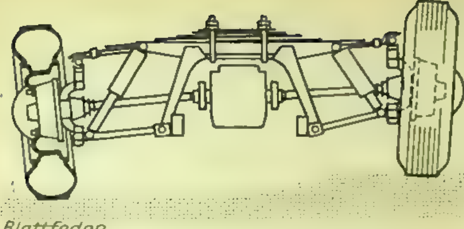
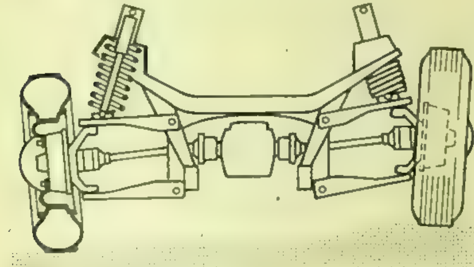
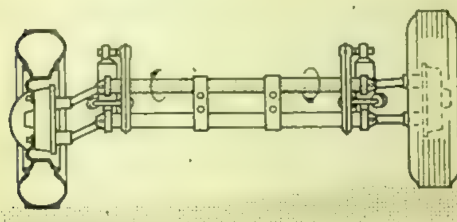


Abb. 16.2.3-1 *GKW-Fahrgestell: **1** Kupplungspedal, **2** Sicherungsdosen, **3** Instrumententafel, **4** Lenkrad, **5** Bremspedal, **6** Handbremse, **7** Schaltgehäuse, **8** Heizkasten, **9** Motor, **10** Vergaser, **11** Luftzuführungskasten, **12** Kupplungsgehäuse, **13** Fahrerhausbock, **14** Wechselgetriebe, **15** Reserveradhalter, **16** Handbremsseil, **17** Gelenkwelle, **18** Teleskopstoßdämpfer, **19** Rahmen, **20** Anhängerkupplung, **21** Achstrieb, **22** Hinterfeder, **23** Abgasschalldämpfer, **24** Federgehänge, **25** Vorderfeder, **26** Felge, **27** Teleskopstoßdämpfer, **28** Auspuffkrümmer, **29** Stoßstange*







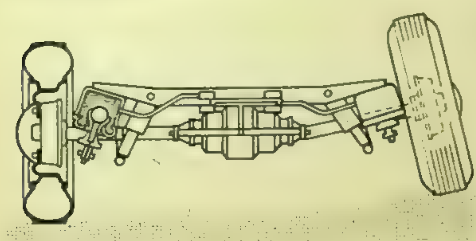


***Abb. 16.2.3-3** Arten von Federungselementen*

richtung von Wulst zu Wulst angeordnetem Fadenverlauf. Darüber befinden sich 2 oder 3 stabilisierende Stahlgürtellagen zur Verhinderung von Verwindungen und übermäßiger thermischer Beanspruchung sowie ein weiterer Gürtel aus stärkerem, gedrilltem Stahldraht zum Schutz vor Rost und Korrosion. Durch besondere Gummimischungen für den Protektor und durch die Profilgestaltung können Reifen für unterschiedliche Einsatzbedingungen optimiert werden. Die *Profilgestaltung* muß vor allem das Abfließen von Wasser gewährleisten, um das gefährliche „Aufschwimmen" (Aquaplaning) zu vermeiden, bei dem die Reifen keine Bremskräfte auf die Fahrbahn übertragen können. Für Matsch und Schnee sowie für Geländefahrt muß das Profil selbstreinigend sein. M+S-Reifen (Matsch und Schnee) wurden vielfach mit Hartmetallstiften (Spikes) versehen (vgl. Abb. 16.2.3-2), die die bisher beste Lösung für das Fahren auf vereisten Fahrbahnen darstellen. Da die Spikes zu einem sehr großen Straßenverschleiß führen, wurden sie in einigen Ländern wieder verboten.

Die ***Radaufhängung*** dient der Radführung und überträgt die zwischen Rädern und Aufbau wirkenden Kräfte. Die *Federung* verringert die Belastungen, die durch Fahrbahnunebenheiten und große Fahrgeschwindigkeit über die Räder in den Aufbau eingetragen werden. Bei der elastischen Verformung der Feder wird Arbeit gespeichert, die bei der Rückverformung nach Entlastung fast vollständig wieder zurückgewonnen wird. Um einen eingeleiteten Schwingungsvorgang so schnell wie möglich zu beenden, müssen deshalb noch (meist hydraulische) *Schwingungsdämpfer* (falsch: *Stoßdämpfer*) verwendet werden. Dadurch wird das „Springen" der Räder verhindert und der für die Fahrsicherheit so wichtige Bodenkontakt gewährleistet. Die Aufgaben der Radaufhängung, Federung und Schwingungsdämpfung können mit der *Blattfeder* durch eine einfache Baugruppe erfüllt werden (vgl. Abb. 16.2.3-1). Eine bessere Wirkung wird jedoch erzielt, wenn für jede Aufgabe eine besondere Baugruppe zur Verfügung steht. Bei guter gegenseitiger Abstimmung von Radaufhängung, Federung und Dämpfung können unangenehme und gefährliche Schwingungsformen vermieden werden. Die grundsätzlichen Federbauarten sind in der Abb. 16.2.3-3 dargestellt, wobei auch einige der vielfältig möglichen Arten der Radaufhängung erkennbar sind (Tafel 62). Der bei Kurvenfahrt durch Fliehkraftwirkung hervorgerufenen Neigung des Aufbaus kann durch eine Versteifung der kurvenäußeren Federn mit Hilfe von *Stabilisatoren*, meist in Form von Drehstabfedern, entgegengewirkt werden.

Die ***Bremsanlage*** umfaßt die auf alle Räder wirkende, in der Regel durch Fuß betätigte *Betriebsbremsanlage*, und eine auf mindestens 2 Räder wirkende, meist handbetätigte *Feststellbremsanlage*. Letztere soll auch als Hilfsbremse dienen, falls die Betriebsbremse ausfällt. Die Bremsanlage besteht aus Betätigungseinrichtung, Übertragungseinrichtung und Bremse, die Bremse aus Trommel oder Scheibe, Bremsbacken und Zuspanneinrichtung (Abb. 16.2.3-4). Die *Scheibenbremse* gewährleistet eine bessere Wärmeabführung und gleichmäßigere Bremswirkung infolge Selbstreinigung von Bremsbelagabrieb, dagegen sind der Schmutzschutz und die Feststelleinrichtung bei der *Trommelbremse* bes-

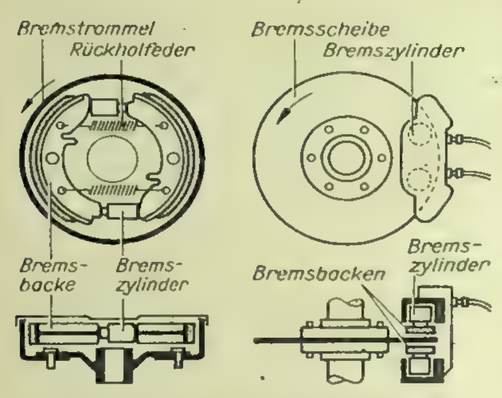


Abb. 16.2.3-4 links Innenbackenbremse (Duplex-System mit 2 Bremszylindern), rechts Scheibenbremse

ser zu verwirklichen. Deshalb hat sich bei PKW international eine Tendenz durchgesetzt, die Vorderräder mit Scheibenbremsen und die Hinterräder mit Trommelbremsen auszurüsten, zumal an den Vorderrädern eine größere Bremswirkung erforderlich ist. Bei GKW und Omnibussen setzt sich die Scheibenbremse erst allmählich durch. Bei PKW sowie kleinen GKW und Omnibussen wird die Fußkraft auf die Zuspanneinrichtung hydraulisch, bei großen GKW und Omnibussen mit Druckluft oder mit druckluftunterstützter Hydraulik übertragen. Bei größeren Fahrzeugen reicht die Fußkraft nicht aus; es werden deshalb Hilfskraftbremsanlagen, bei denen die Fußkraft durch Hilfskräfte verstärkt wird, oder Fremdkraftbremsanlagen, bei denen die Fußkraft nur noch zum Steuern der durch Vakuum oder Druckluft aufgebrachten Betätigungskräfte dient, eingesetzt. Zur Verbesserung der Sicherheit wird die Betriebsbremsanlage in 2 voneinander unabhängige Bremskreise aufgeteilt, so daß bei Ausfall eines Kreises das Fahrzeug noch mit dem zweiten Kreis gebremst werden kann (*Zweikreisbremsanlage*).

Bei Fahrzeugen mit stark veränderlicher Achsbelastung als Folge veränderlicher Lademasse kann eine Anpassung der Bremskräfte durch eine hand- oder automatisch betätigte Steuerung (*automatische lastabhängige Bremse, ALB*) erfolgen.

Ungebremste Anhänger dürfen nur für eine relativ kleine Nutzmasse verwendet werden. Auch für PKW-Anhänger hat sich schon weitgehend die *Auflaufbremse* durchgesetzt. Bei ihr wird die durch das „Auflaufen" des Anhängers auf das Zugfahrzeug hervorgerufene Deichselkraft zur Betätigung der Bremse benutzt. Anhänger für große Nutzmasse sind mit *Druckluftbremsen* ausgerüstet. Infolge noch fehlender internationaler Standardisierung werden Anhängerbremsen als *Ein-* oder *Zweileitungsbremsanlage* ausgeführt, wobei die letztere insgesamt vorteilhafter ist. Um die Austauschbarkeit der Anhänger im Fuhrpark zu gewährleisten, müssen die Zugfahrzeuge vorerst für beide Systeme ausgerüstet sein. Alle Anhängerbremsen werden grundsätzlich so ausgebildet, daß bei unbeabsichtigtem Abreißen des Anhängers vom Zugfahrzeug der Anhänger selbsttätig gebremst wird.

Bei Fahrzeugen mit großer Gesamtmasse (z. B. 38-t-Zug) reicht die Betriebsbremsanlage bei langen Gefällestrecken und großer Fahrgeschwindigkeit nicht aus, um die durch die Radbremsen in Wärme umgeformte Bewegungsenergie schnell genug an die Umgebung abzuführen, so daß die Bremswirkung nachläßt. Bei einer auftretenden Gefahr ist dann das Fahrzeug vielfach nicht mehr zum Stehen zu bringen. Deshalb werden besondere *Dauerbremsen* angewendet. Bei der *Auspuffbremse* wird mit Hilfe einer besonderen Ventilbetätigung der Motor als Kompressor verwendet, der viel Bewegungsenergie umwandeln kann. Eine andere Möglichkeit ist der Einbau von *Wirbelstrom-*, *Wasserwirbel-* oder *Strömungsbremsen*, die zweckmäßigerweise mit dem Getriebe zu einer Baueinheit zusammengefaßt werden.

Lenkung. Mit ihr kann der Fahrer eines Kfz die Fahrtrichtung willkürlich beeinflussen und äußere Störeinflüsse (z. B. infolge einer Seitenkraft durch Fahrbahnneigung oder Seitenwind) ausgleichen. Sie besteht i. allg. aus Lenkrad, Lenkspindel, Lenkgetriebe, Lenkstockhebel, Spurstange, Lenkschubstangen und Lenkhebeln an den Rädern (Abb. 16.2.3-5). Zur Änderung der Fahrtrichtung wird bei Kraftwagen ausschließlich die *Achsschenkellenkung*, bei Anhängern vorwiegend die *Drehschemellenkung*, angewendet. Im allgemeinen werden nur die Vorderräder gelenkt. Bei GKW für besonders große Tragfähigkeit gibt es Ausführungen mit 2 gelenkten Vorderachsen. Kraftfahrzeuge, die besonders wendig sein müssen (z. B. für militärische Zwecke oder für die Forstwirtschaft), haben eine *Allradlenkung*. Die Drehbewegung des Lenkrads wird im *Lenkgetriebe* (Abb. 16.2.3-6) in eine

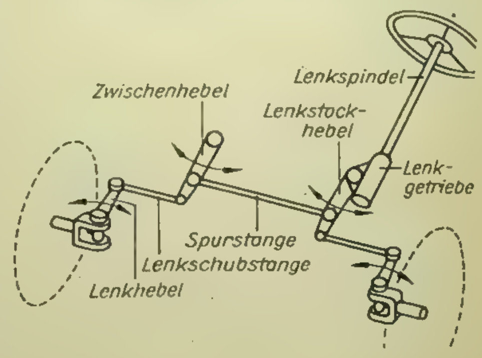


Abb. 16.2.3-5 Lenkung

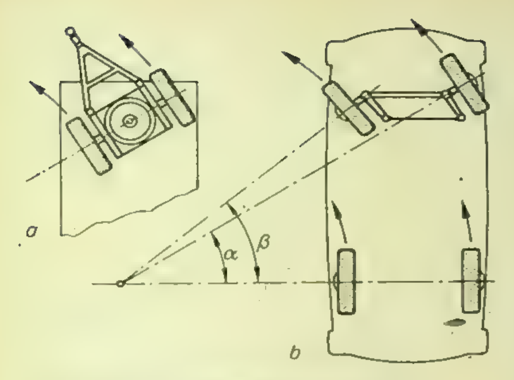


Abb. 16.2.3-6 a Drehschemel- und b Achsschenkellenkung

geradlinige (*Zahnstangenlenkung*) oder eine Schwenkbewegung (*Schrauben-* und *Schneckenlenkung*) umgeformt.
In Kraftfahrzeugen für große Tragfähigkeit wird die erforderliche Lenkkraft so groß, daß zur Erleichterung der Arbeit des Kraftfahrers eine *Lenkhilfe* (*Servolenkung*) eingesetzt werden muß. Die unterstützende Wirkung kommt dadurch zustande, daß bei einem Lenkradausschlag ein durch Drucköl, Druckluft oder Unterdruck betätigter Arbeitszylinder auf den Lenkstockhebel einwirkt. Derartige Lenkhilfen müssen aus Sicherheitsgründen so gestaltet sein, daß bei Ausfall des Arbeitszylinders eine Lenkbetätigung von Hand noch gewährleistet ist.
Das *Lenkverhalten* des Kfz hängt nicht nur von der Lenkung, sondern auch von der Achskonstruktion und den Einstellwerten (Vorspur, Nachlauf, Schräglaufwinkel) ab. Der *Lenkrollradius* (Abstand zwischen Auftreffpunkt der Achse des Achsschenkelbolzens auf der Fahrbahn und Radmitte) ist der Hebelarm, mit dem Bremskräfte (bei Frontantrieb auch Antriebskräfte) als Störkräfte in der Lenkung wirksam werden. Kann dieser durch konstruktive Maßnahmen negativ gewählt werden, wird das gefürchtete Schiefziehen bei Bremsmanövern auf Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibbeiwerten (z. B. teilweise vereiste Straße) vermieden und der Wagen bleibt in der Spur.
Triebwerk. Zu ihm gehören der Motor mit allen zu seinem Betrieb notwendigen Einrichtungen (Kühler, Lüfter, Starteinrichtung usw.) und sämtliche Teile zur Kraftübertragung bis an die Triebräder (Kupplung, Getriebe, Ausgleichgetriebe, Gelenkwellen, Antriebsachsen und gegebenenfalls Raduntersetzungsgetriebe). Beim *Standardantrieb* sind Motor, Kupplung und Getriebe zwischen den Vorderrädern angeordnet und treiben über Gelenkwelle und Ausgleichgetriebe die Hinterräder an. Beim *Frontantrieb* befinden sich Motor und Getriebe ebenfalls zwischen den Vorderrädern, wobei das Getriebe auch das Ausgleichgetriebe mit enthält. Angetrieben werden die Vorderräder. Diese Bauweise wird wegen ihrer sehr günstigen Raumausnutzung international in immer größerem Maße angewendet. Beim *Heckantrieb* befindet sich der Triebwerkblock über oder hinter der Hinterachse und treibt die Hinterräder an. Ein Vorteil dieser Bauweise besteht darin, daß die angetriebenen Räder nicht auch gleichzeitig gelenkt werden müssen. Der *Allradantrieb* ist für Geländewagen und Baustellenfahrzeuge zweckmäßig, wobei der Motor i. allg. zwischen den Vorderrädern, teilweise aber auch hinter der Hinterachse angeordnet ist. Bei GKW, die keine besonders große Bodenfreiheit haben müssen, wird der Motor auch in liegender Anordnung zwischen der Vorder- und Hinterachse eingebaut (*Unterflurmotor*). Diese Einbauart ist teilweise auch in Omnibussen zu finden; i. allg. werden Omnibusse jedoch mit einem Hecktriebsatz angetrieben, der sich gut kapseln läßt.
Kupplung. Der Verbrennungsmotor kann erst von einer gewissen Umlauffrequenz an (z. B. > 15 U/s) ein zum Anfahren ausreichendes Drehmoment abgeben. Dieser Nachteil wird durch die zwischen Motor und Getriebe angeordnete Kupplung ausgeglichen. Mit ihr kann beim Anfahren das Antriebsmoment von der drehenden Kurbelwelle allmählich auf die zunächst stillstehende Getriebeantriebswelle übertragen werden. Weiterhin ermöglicht die Kupplung die Unterbrechung des Kraftflusses bei stehendem Fahrzeug und Leerlauf des Motors sowie beim Schalten des Wechselgetriebes. Dazu werden vorwiegend mechanische (*Reibungs-*) *Kupplungen*, meist als Einscheiben-Trockenkupplung (vgl. Abb. 9.1.5-1), verwendet. Bei relativ großen Drehmomenten, wie sie in GKW oder Rennwagen vorkommen, sind auch Zweischeibenkupplungen üblich. Bei automatischen Getrieben oder bei Motorrädern werden Mehrscheiben-(Lamellen-)Kupplungen wegen ihres geringen Bauraumbedarfs eingesetzt. Bei Motorrädern wird die Kupplung von Hand betätigt, in allen anderen Kraftfahrzeugen erfolgt sie durch Fußbetätigung. Die Betätigungskraft wird dabei mechanisch über Seilzug bzw. Gestänge oder hydraulisch vom Betätigungshebel auf den Ausrückhebel der Kupplung übertragen. Durch Zusatzeinrichtungen können Kupplungen nach verschiedenen Wirkprinzipen zu *Kupplungsautomaten* ausgebaut werden. Bei diesen ist kein Kupplungspedal notwendig. Beim Berühren des Schalthebels wird die Kupplung unabhängig von der Umlauffrequenz des Motors automatisch aus- und nach dem Loslassen wieder eingerückt. Außerdem kuppelt der Automat in Abhängigkeit von der Umlauffrequenz des Motors beim Betätigen des Gaspedals (Anfahren und Gangwechsel) automatisch ein.

Für Kraftfahrzeuge mit großer Tragfähigkeit oder Omnibusse, die infolge kurzer Haltestellenabstände sehr häufig anfahren müssen, und bei PKW mit Getriebeautomaten, haben sich *Strömungskupplungen* bewährt. Sie ermöglichen ein ermüdungsfreies, ruckfreies Anfahren.

Wechselgetriebe. Verbrennungsmotoren benötigen bei kleinen Umlauffrequenzen zur Umwandlung des ungenügenden Drehmoments in ein großes Drehmoment einen Drehmomentwandler, das *Wechselgetriebe.* Für PKW werden i. allg. 4 oder 5 Vorwärtsgänge und 1 Rückwärtsgang vorgesehen. Für GKW und Omnibusse haben die Getriebe 5 bis 12 Gänge. Vielganggetriebe sind insbesondere für Geländewagen erforderlich.

Komfortabler, aber auch teurer und mit größerem Kraftstoffverbrauch verbunden sind *Strömungsgetriebe*, bei denen zwischen der größt- und kleinstmöglichen Übersetzung eine stufenlose Wandlung erfolgt. Am weitesten verbreitet sind die auf der Basis des *Föttinger-Wandlers* (vgl. Abb. 9.1.7-11) arbeitenden *Trilokwandler.* Strömungsgetriebe werden vielfach mit einem dreistufigen Planetengetriebe zu *Getriebeautomaten* zusammengefaßt. Sie sind heute so gut entwikkelt, daß sie kaum noch Nachteile hinsichtlich des Wirkungsgrads (und damit des Kraftstoffverbrauchs) gegenüber handgeschalteten Getrieben aufweisen. Um auch die Bedienbarkeit der billigeren Zahnradstufengetriebe zu verbessern und das Schalten zu erleichtern, werden diese nahezu ausschließlich mit *Synchronisationsvorrichtungen* ausgestattet. Über eine Reibungskupplung werden beim Schalten das Zahnrad des zu schaltenden Gangs und die Hauptwelle in der Umlauffrequenz einander angeglichen. Bei großen Entfernungen zwischen Fahrersitz und Getriebe, z. B. bei Omnibussen, werden Stufengetriebe mit einer *Schalthilfe* in Form eines hydraulischen oder pneumatischen Arbeitszylinders ausgerüstet. Aber auch automatische Getriebe (z. T. mit Vorwählschaltung) als Kombination von Strömungskupplung und nachgeschaltetem mechanischem Getriebe sind gebräuchlich. Bei PKW mit Zweitaktmotor enthält das Wechselgetriebe zusätzlich einen *Freilauf* (bei Viertaktmotoren nur ausnahmsweise), der bei Schiebebetrieb zum Einsparen von Kraftstoff dient.

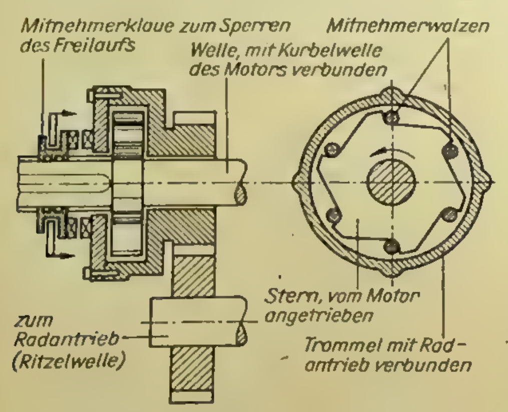


Abb. 16.2.3-7 Freilaufeinrichtung eines PKW; im Freilauf dreht sich die Trommel schneller als die Motorwelle, zum Antrieb der Räder der Stern schneller als die Trommel

Ausgleichgetriebe (*Differential*). Es befindet sich zwischen den angetriebenen Rädern (Abb. 16.2.3-7) und gleicht die Umlauffrequenzen des kurveninneren und -äußeren Rades entsprechend der unterschiedlichen Weglängen aus. Das Differential ermöglicht unterschiedliche Umlauffrequenzen der Räder bei Kurvenfahrt; sonst würden die Reifen bei Kurvenfahrt radieren.

Karosserie. Für den Erfolg einer Kfz-Entwicklung ist die Karosserieform von sehr großer Bedeutung. Sie wird meist ein Kompromiß zwischen technischen und ästhetischen Gesichtspunkten sein. Bei der Formgestaltung sind zu beachten: Funktion des Fahrzeugs, Aerodynamik, Sicht- und Platzverhältnisse, Unfallsicherheit, verfügbare Werkstoffe, Leichtbau, Herstellungs- und Instandhaltungsaufwand. In der Großserienproduktion werden Karosserien für PKW heute meist aus einem tragenden Stahlblechgerippe mit Stahlblech-, seltener Plastaußenhaut hergestellt. Dabei wird die Karosserie bei Verwendung von Füge- (Schweiß-) Robotern schon weitgehend automatisch gefertigt. Das trifft auch auf die Karosserien von Omnibussen und die Fahrerhäuser von GKW zu. Dagegen werden GKW-Aufbauten in Abhängigkeit von der erforderlichen Stückzahl vielfach nur in Kleinserien oder Einzelfertigung hergestellt.

Von den früher vielfältigen Karosseriearten haben sich nur *Limousine*, *Kombiwagen* und *Coupé* in großem Maße durchgesetzt. Immer beliebter werden Karosserien, die sich mit wenig Umbauhandgriffen unterschiedlichen Verwendungszwecken anpassen lassen. Im Omnibusbau haben sich spezielle Karosserien für den Reise- und Linienverkehr einerseits und den Linienstadtverkehr andererseits ergeben. Während der Bus für Reise- und Besichtigungsfahrten großen Komfort verlangt, muß der Stadtlinienbus viel Fahrgäste aufnehmen können und einen schnellen Fahrgastwechsel ermöglichen. Für den Stadtverkehr haben sich neben dem normalen Bus *Gelenkbusse* (Motorwagen und Anhänger sind über ein Gelenk zu einer Einheit zusammengefaßt) — und, falls die Fahrzeughöhe nicht hinderlich ist — *Doppelstockomnibusse* bewährt.

Bei den GKW ist der meistverbreitete Aufbau noch die *Pritsche*, wobei auf dem Kasten, von dem 2 Seitenwände und die Rückwand herabklappbar ausgeführt sind, eine Verdeckplane

aufgesetzt werden kann, die das Ladegut vor Witterungseinflüssen schützt. Zur Beseitigung schwerer körperlicher Arbeit beim Laden werden Ladebordwände oder Ladekrane verwendet.
Der geschlossene *Kofferaufbau* mit seitlicher und rückwärtiger Türanordnung ist hauptsächlich bei Liefer-, Möbel-, Verkaufswagen sowie für militärische Zwecke üblich. Sowohl für zivile als auch für militärische Verwendung haben Wechselaufbauten und Container große Bedeutung erlangt, die eine vielfältige Nutzung des Trägerfahrzeugs erlauben.
Kraftfahrzeugausrüstungen. Funktion und Zuverlässigkeit der Hauptbaugruppen sowie der Komfort des Fahrzeugs hängen vielfach von den verwendeten Ausrüstungen (Zubehör) ab. Dazu gehören die elektrische/elektronische Ausrüstung, wie Batterie, Generator, Anlasser, Regler, Zündeinrichtung, Kraftstoff-Förderanlage und -Einspritzeinrichtung, Hilfseinrichtungen für den Kaltstart, Filter, Beleuchtungseinrichtung, Blinkanlage, Horn, Rückspiegel, Scheibenwischer, Radio, Heizung oder Klimaanlage, Feuerlöscher, Werkzeug usw. Zur Überwachung wichtiger Funktionen sind im Blickfeld des Fahrers am *Instrumentenbrett* Anzeigegeräte für Fahrgeschwindigkeit, Fahrstrecke, Umlauffrequenz des Motors, Kühlmitteltemperatur, Kraftstoffvorrat, Druck und Temperatur des Schmiermittels, Druck im Bremsluftbehälter und gegebenenfalls weitere Kontrolleinrichtungen vorhanden. Diese sollten im Interesse der Verkehrssicherheit nicht nur nach ergonomischen Gesichtspunkten, sondern auch international genormt angeordnet sein. Das letztere trifft insbesondere auf die Hauptbetätigungselemente zu, um Fehlbedienungen zu vermeiden. Der Verkehrssicherheit dient auch die Lichtanlage, bestehend aus Hauptscheinwerfer, Rückfahrscheinwerfer, Bremsleuchte (gelbrot), Schlußleuchte (rot), Fahrtrichtungsanzeiger kombiniert mit Warnblinkanlage (orange). Neben dieser vorgeschriebenen Mindestausrüstung können noch 2 Zusatzscheinwerfer für Fernlicht und 2 Breitstrahler (Nebel- oder Kurvenscheinwerfer) verwendet werden.
Anhänger sind vielfach mit *Reifenwächtern* (Abb. 16.2.3-8) ausgerüstet. Sie geben dem Fahrer ein Warnsignal, sobald der Reifenluftdruck kleiner als ein vorher eingestelltes Maß geworden ist. Kontrolleuchten können den Fahrer weiterhin über ausgefallene Lampen informieren. Neben derartigen Einrichtungen, die den Fahrer sofort von einem aufgetretenen Schaden unterrichten, können Fahrzeuge auch mit Diagnosenetzen ausgestattet werden, die es beispielsweise ermöglichen, die Funktionsfähigkeit und den Verschleißzustand von Baugruppen zu erfassen. Die immer größer werdenden Anforderungen an Ausrüstungen führen schließlich dazu, daß im Kraftfahrzeug eine „Zentralelektronik" installiert wird, die mit Hilfe von Mikroprozessoren eine Vielzahl von Erkennungs- und

Steuerfunktionen ausüben kann. Zur Realisierung der Steuerbefehle wird eine „Zentralhydraulik" notwendig, die eine zweckmäßige Ergänzung zum jetzt bereits üblichen elektrischen und hydraulischen Bordnetz darstellt. Um den Instandhaltungsaufwand zu vermindern, müssen die Ausrüstungen in Zukunft wesentlich wartungs- und reparaturfreundlicher als bisher gestaltet werden.

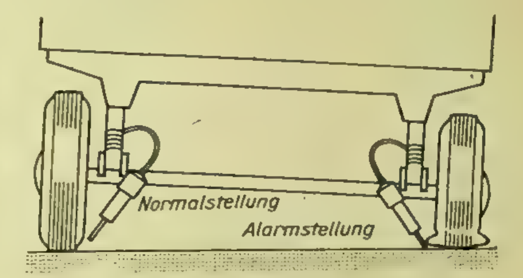


Abb. 16.2.3-8 Reifenwächter

16.2.4. Straßenverkehrstechnik

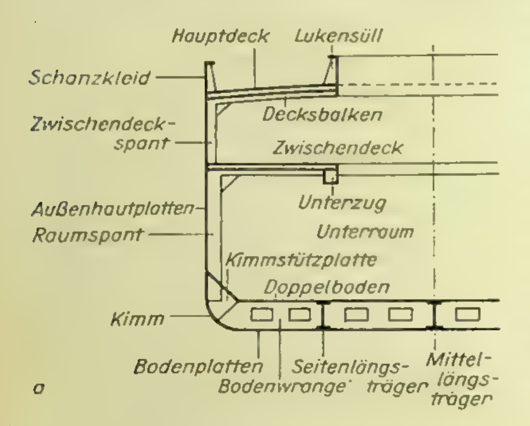
In der Straßenverkehrstechnik werden der Verkehrsablauf und dessen Auswirkungen auf die Gestaltung der Straßenverkehrsanlagen untersucht, die Leistungsfähigkeit der Verkehrsmittel, die Durchlaßfähigkeit und zweckmäßige Gestaltung der Verkehrs- und Betriebsanlagen des Straßenverkehrs ermittelt sowie die Straßenverkehrssicherheit geprüft. Die Tab. 16.2.4-1 enthält Näherungswerte der Durchlaßfähigkeit.

Tab. 16.2.4-1 *Durchlaßfähigkeit von Straßen*

Straßenart	PKW/h und Spur von 3 m Breite
zweispurig	
Landstraße	345
Stadtstraße	580
dreispurig	
Landstraße	380
Stadtstraße	510
vierspurig	
Landstraße	580
Stadtstraße	910

Dabei wurde für Landstraßen eine Fahrgeschwindigkeit von 70 bis 80 km/h, für Stadtstraßen von 50 bis 65 km/h zugrunde gelegt. Bestimmend für die Durchlaßfähigkeit eines Straßennetzes sind die Kreuzungen von Fahrbahnen auf gleichem Niveau, die infolge abbiegender Fahrzeuge eine kleinere Durchlaßfähigkeit als die freie Strecke haben. Zur Gewährleistung der

Sicherheit sind Knotenpunkte (vgl. 15.11.2.) z. T. mit *Lichtsignalanlagen* ausgerüstet. Von der ursprünglichen Signalsteuerung jedes einzelnen Knotenpunkts geht die Entwicklung zur Steuerung als „grüne Welle" über mehrere Knotenpunkte hinweg bis zu zentralgesteuerten Anlagen für einen Stadtteil oder das ganze Stadtgebiet. Dazu wurde u. a. das Verkehrsaufkommen über zahlreiche Fernsehkameras erfaßt und über Großrechenanlagen (Prozeßrechner) für die Signalsteuerung verarbeitet. In Zukunft werden dafür billigere Mikroprozessoren eingesetzt.



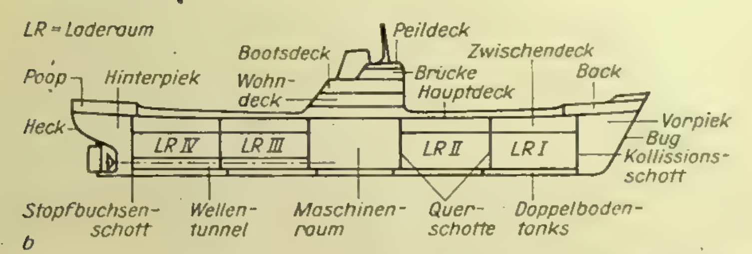


Abb. 16.3.1-1 *a Querschnitt durch den Laderaum und b Längsschnitt eines Stückgutfrachtschiffs*

Trotz derartiger Steuerungen sind niveaugleiche Kreuzungen zu verwerfen, weil sie durch den intermittierenden Betrieb der Fahrzeugströme zu ≈ 100 % Mehrverbrauch an Kraftstoff und 500 bis 600 % mehr Schadstoffen in den Auspuffgasen führen, als dies bei kontinuierlicher Fahrt möglich wäre. Für die Perspektive werden deshalb Kreuzungen mit Fahrbahnen auf unterschiedlichem Niveau angestrebt.
Die ausschließlich dem Schnellverkehr mit Kraftfahrzeugen dienenden Autobahnen haben keine höhengleichen Kreuzungen und sind deshalb wirtschaftlicher, umweltfreundlicher und sicherer. Sie sind nur für Fahrzeuge zugelassen, die mehr als 40 km/h Höchstgeschwindigkeit erreichen.

16.3.1. Schiffstechnik

Schiffe sind größere Wasserfahrzeuge, die durch einen Auftrieb vom Wasser getragen werden. Bei Verdrängungsschiffen wird er durch das vom Schiffskörper verdrängte Wasservolumen nach dem Archimedischen Prinzip hervorgerufen. Tragflügelschiffe und Gleitboote erhalten in der Schnellfahrt einen dynamischen Auftrieb durch aufwärtsgerichtete Kräfte am schrägangestellten Tragflügelprofil bzw. Schiffsboden. Bei Luftkissenschiffen wird der Auftrieb durch den gegenüber dem Atmosphärendruck höheren Druck eines Luftpolsters unter dem Fahrzeugboden erzielt.
Schiffskörper. Der Schiffskörper wird durch eine wasserdichte, aus Boden, Bordwänden und Deck bestehende, innen ausgesteifte Hülle gebildet (Abb. 16.3.1-1). Querschiffs erfolgt die Aussteifung durch *Spanten* an den Bordwänden, *Bodenwrangen* am Schiffsboden, *Decksbalken* unter dem Deck sowie durch *Querschotte*, die gleichzeitig den Schiffskörper der Länge nach in wasserdichte Abteilungen bzw. Räume unterteilen. In Längsrichtung erhält der Schiffskörper durch den *Kiel* (heute allgemein als Flachkiel, nur bei kleinen Wasserfahrzeugen noch als Balkenkiel ausgebildet), der an den Schiffsenden in den *Hinter-* bzw. *Vorsteven* übergeht, durch *Mittel-* und *Seitenträger* im Schiffsboden, *Längsspanten* und *Seitenstringer* an den Bordwänden, *Decksunterzüge* unter dem Deck sowie durch die Bordwände selbst, bei Tankern zusätzlich durch *Längsschotte*, seine Festigkeit. Mit Ausnahme der meisten Tanker haben alle Seeschiffe einen *Doppelboden*, der ihnen im Falle einer Grundberührung erhöhte Sicherheit gegen eindringendes Wasser gibt. Der Doppelboden ist in mehrere wasser- und teilweise öldichte Zellen unterteilt, die zur Aufnahme von Treibstoffen, Frisch- und Ballastwasser genutzt werden. Fahrgast- und Stückgutfrachtschiffe haben ein oder mehrere *Zwischendecks*. Das von unten gezählt erste zwischen Hinter- und Vorsteven durchgehende Deck wird als *Hauptdeck* bezeichnet. Darüber

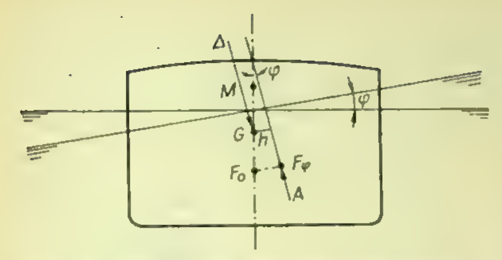


Abb. 16.3.1-2 Bildung des Stabilitätsmoments (M = Metazentrum, G = Massemittelpunkt, F_0 = Formschwerpunkt des aufrecht schwimmenden Schiffs, F_φ = Formschwerpunkt beim Krängungswinkel φ, h = Hebelarm des Stabilitätsmoments, A = Auftrieb als aufwärts gerichtete Kraft, Δ = Deplacement, wirkt als Schwerkraft)

liegende Decks sind Aufbaudecks. Schüttgutfrachter, Tanker und überwiegend auch Containerschiffe haben nur ein Deck. Die wasserdichten Querschotte müssen stets bis zum Hauptdeck reichen. *Aufbauten* sind Teile des Überwasserschiffs, die von Bord zu Bord reichen, wie die *Back* im Vorschiff, die *Poop* im Hinterschiff und die *Brücke*, einst nur im Mittelschiff, heute auch vorn oder hinten. Bauten, die nicht von Bord zu Bord reichen, sind *Deckshäuser*, wie z. B. Windenhäuser. Jeweils in Fahrtrichtung gesehen wird die linke Seite eines Schiffs mit *Backbord* (*BB*) und die rechte Seite mit *Steuerbord* (*StB*) bezeichnet.
Die Form des Unterwasserschiffs sowie die Massenverteilung im Schiff bestimmen maßgeblich die Stabilität. Unter *Stabilität* versteht man die Fähigkeit eines Schiffs, sich aus einer längs- oder quergeneigten Lage wieder aufzurichten (Abb. 16.3.1-2). Die Längsstabilität wird durch den *Trimm*, als Unterschied der Tiefgänge an Bug und Heck, ausgedrückt. Unter Querstabilität versteht man die Sicherheit gegen Kentern. Sie hängt von der Formschwerpunktslage des eingetauchten Schiffskörpervolumens und der Lage des Massenschwerpunkts ab. Als Anfangsstabilität wird die Strecke zwischen dem Massenmittelpunkt und dem Metazentrum, einem gedachten, von der Unterwasserschiffsform abhängigen Bewegungsmittelpunkt des querrollenden Schiffs, genommen. Der Stabilitätsumfang hängt vom Hebelarm des Stabilitätsmoments als dem senkrechten Abstand zwischen den Wirkungslinien des Auftriebs und der Schwerkraft des Schiffs, die ein Kräftepaar bilden, ab. Der Hebelarm des Stabilitätsmoments wächst zunächst mit zunehmender Krängung (Neigung) des Schiffs, erreicht ein Maximum und fällt dann wieder ab. Bei statisch wirkenden äußeren Kräften ist der Krängungswinkel beim Hebelarmmaximum der *Kenterwinkel*.
Schiffsausrüstung. Die schiffbauliche Ausrüstung dient der Führung und seemännischen Handhabung des Schiffs, der Lebensrettung im Seenotfall, der Ladungsübernahme und -sicherung sowie den sozialen Belangen zur Unterbringung und Versorgung von Besatzung und Fahrgästen.
Ruderanlage. Sie umfaßt alle Bauteile, die zum Steuern eines Schiffs erforderlich sind, wie *Steuerstand* auf der Brücke, *Rudermaschine* zur Kraftübertragung auf *Ruderschaft* und *-blatt*. Auf Seeschiffen befindet sich zusätzlich zur Handsteuerung eine *Selbststeueranlage* auf der Brücke, die mit dem Kompaß verbunden, sich automatisch einschaltet, sobald das Schiff vom eingestellten Kurs abweicht, und wieder ausschaltet, wenn der vorgegebene Kurs wieder anliegt. *Rudermaschinen* werden auf größeren Schiffen elektrisch oder elektrohydraulisch angetrieben und drehen das am Ruderschaft befindliche Ruderblatt um einen auf dem Steuerstand eingestellten Drehwinkel, der bei Seeschiffen im Maximum (Hartruderlage) < 35° bleibt.
Quadrantruderanlagen bestehen aus einem oben auf den Ruderschaft aufgesetzten Viertelkreissegment mit Zahnkranz, in den ein Ritzel oder eine Schnecke, von einem Elektromotor angetrieben, eingreift. Bei *hydraulischen Rudermaschinen* wird ein Querhaupt auf dem Ruderschaft durch Hydraulikzylinder bewegt. Die Ruderblätter haben allgemein im Querschnitt stromlinienförmige Profile.
Flächenruder werden nach der Lage des Ruderschafts und der Befestigung am Hintersteven unterschieden (Abb. 16.3.1-3).
Aktivruder nennt man ein Profilruder, das horizontal am Ruderblatt in Höhe der Schiffspropellerachse einen kleinen mechanisch oder elektrisch angetriebenen Propeller hat. Damit kann auch bei geringen Schiffsgeschwindigkeiten sowie beim An- und Ablegen eine ausreichende Ruderwirkung erzielt werden, was mit einem normalen Ruderblatt, dessen Wirkung von der Ausströmgeschwindigkeit abhängt, nicht möglich ist.
Düsenruder bestehen aus einer begrenzt nach beiden Schiffsseiten drehbaren Ummantelung des Propellers, die den Propellerstrahl umzulenken vermag. *Querstrahlruder* sind in Rohrkanälen quer zur Schiffslängsachse einen Wasserstrahl

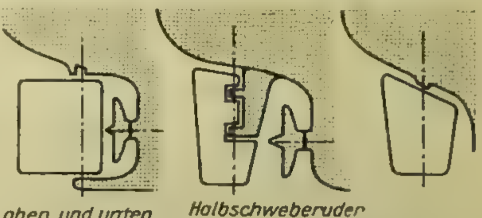


Abb. 16.3.1-3 *Ruderarten*

erzeugende, umsteuerbare Propeller. Sie befinden sich am Bug und gelegentlich auch am Heck schneller und langer Seeschiffe, um deren Manövrierfähigkeit in engem Fahrwasser zu verbessern.

Decksausrüstungen. *Ankerausrüstung.* Zum Festlegen eines Schiffs im freien Wasser, z. B. auf Reede, und mitunter zur Sicherung der Schiffslage im Hafen, sind *Anker* erforderlich. Allgemein werden 2 in Ankertaschen hängende *Buganker* und ein an Deck befindlicher *Reserveanker* gefahren. Bei Binnenschiffen sind auch *Heckanker* üblich. Seeschiffe, die auf Strömen ankern müssen, benötigen ebenfalls einen Heckanker (Stromanker). Zur Bugankerausrüstung gehören *Anker*, *Ankerkette*, *Kettenkneifer* zum Festhalten der Kette, *Ankerspill* zum Einholen und Auslassen des Ankers und *Kettenkasten*.

Vertäu- und Verholausrüstung. Sie dient dem Befestigen des Schiffs am Kai sowie für Bewegungen parallel zum Kai ohne Zuhilfenahme der Schiffsantriebsanlage (Abb. 16.3.1-4). Bestandteile sind *Poller, Klampen, Klüsen, Trossen* und *Verholspills* bzw. *-winden*. *Mooringwinden* sind automatisch einen gleichbleibenden Trossenzug gewährleistende Verholwinden.

Rettungsausrüstung. Die Ausstattung eines Seeschiffs mit Rettungsmitteln ist nach dem Internationalen Schiffssicherheitsvertrag sowie nach nationalen Bestimmungen geregelt. Dazu gehören *Rettungsboote* aus Leichtmetallblech oder Plast mit Hand- oder Motorantrieb, starre *Metallrettungsflöße*, sich automatisch aufblasende *Rettungsinseln* mit Zeltdach, *Rettungsringe*, *Schwimmwesten* und *Notsignalgeräte*. Für die Rettungsboote werden *Aussetzvorrichtungen*, meist *Davits* (Abb. 16.3.1-5), und für die Rettungsinseln auf Fahrgastschiffen *Aussetzkrane* benötigt. Rettungsboote und -inseln sind mit Notproviant, Trinkwasser und Medikamenten ausgestattet.

Lade- und Löschausrüstungen. Für das Laden und Löschen in Häfen ohne Kranausstattung benötigen Frachtschiffe bordeigene Hebezeuge bzw. Fördermittel. Auf Stückgutfrachtschiffen sind *Ladegeschirre* üblich (Abb. 16.3.1-6), deren von *Pfosten*, *Geien* und *Hanger* (beides Seile) gehaltene *Ladebäume* mittels durch Ladewinden bewegte *Läufer* (Lastseile) die Lasten heben und senken. Die Tragkräfte reichen bei Leichtgutladegeschirren bis 100 kN, bei Schwergutla-

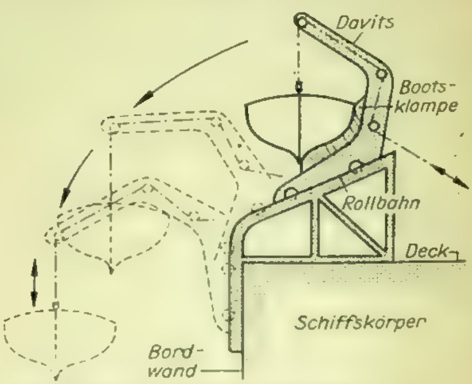


Abb. 16.3.1-5 Schwerkraft-Rollbahn-Davits

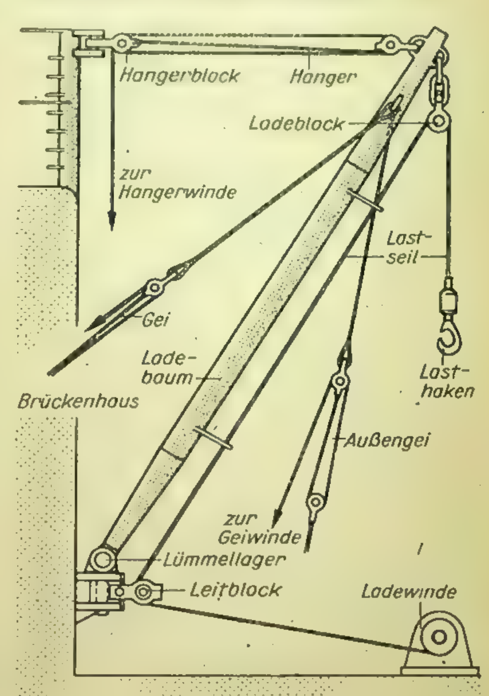


Abb. 16.3.1-6 Ladegeschirr

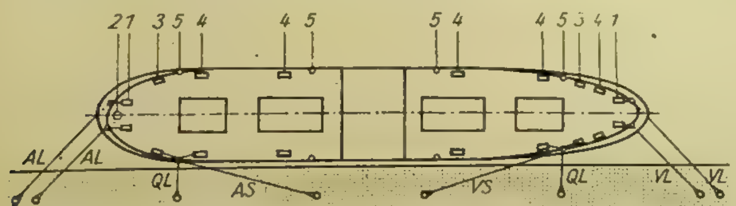


Abb. 16.3.1-4 *Verhol- und Vertäueinrichtung eines Seefrachtschiffs: 1 Schlepp- und Festmachepoller, 2 Verholspill, 3 Klampen für Springleinen, 4 Festmachepoller, 5 Seitenklüsen (AL = Achterleine, AS = Achterspring, QL = Querleine, VS = Vorspring, VL = Vorleine)*

degeschirren bis 1,2 MN und für spezielle Schwergutschiffe sogar bis 3 MN.
Anstelle der Ladegeschirre sowie auch zusätzlich werden Stückgutfrachter zunehmend mit *Bordwipp-* oder *Mastkranen* ausgerüstet. In Ausnahmefällen sind Spezialschiffe mit über Deck verfahrbaren *Brückenkranen* und Erzfrachter mit über dem Schiffsboden verlegten *Bandförderanlagen* und *Absetzern* nach außenbords versehen. Tanker haben *Ladepumpen* und ein *Ladeleitungssystem*.

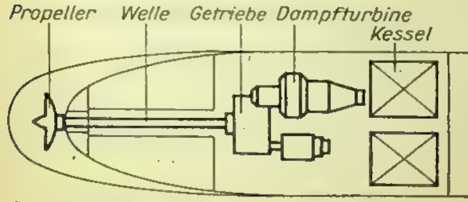
Lukenabdeckungen. Zum wasserdichten Verschließen der Luken sind Lukenabdeckungen erforderlich. Die einfachste Abdeckung besteht aus längsschiffs von Hand verlegten *Holzdeckeln*, die auf dem Lukenquersüll und querschiffs eingehängten Balken, den *Scherstöcken*, ruhen. Auf dem Wetterdeck werden darüber *Persenninge* verlegt und festgesetzt. Moderne Schiffe sind mit mechanisch zu betätigenden *Stahllukendeckeln* ausgerüstet. Häufig angewandt wird das *Single-Pull-System*, bei dem Stahldeckel durch Seil- oder Kettenzug auf dem Lukenlängssüll gerollt und am Quersüll gestaut werden.

Schiffsantriebe. Zur maschinentechnischen Ausrüstung eines Schiffs gehören die Hauptmaschinenanlage und die Hilfsmaschinen. Hauptmaschinenanlagen bestehen aus Verbrennungs- oder Dampfkraftmaschinen sowie

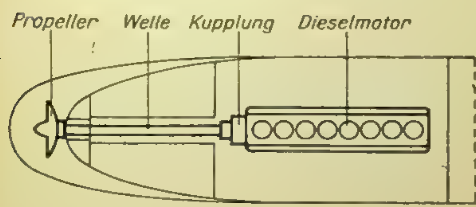
einer mechanischen, hydraulischen oder elektrischen Kraftübertragungseinrichtung zum Schiffspropeller (Abb. 16.3.1-7).

Dieselmotorantrieb. Am weitesten verbreitet ist der Dieselmotor (vgl. 2.6.2.) als Schiffsantrieb. Er wird verwendet als 1. *langsamlaufender* (100 bis 250 U/min), direktantreibender umsteuerbarer *Zweitakt-Kreuzkopfmotor* mit Diesel- oder Schwerölbetrieb im Leistungsbereich von 3 bis 40 MW, 2. *mittelschnellaufender* (250 bis 500 U/min) *Viertakt-Tauchkolbenmotor* mit Diesel- oder Schwerölbetrieb in Reihen- oder V-Bauart mit Zylinderleistungen bis zu ≈ 1 MW, der über Kupplung und Getriebe als *Ein-* oder *Mehrmotorenanlage* auf die Propellerwelle arbeitet, und 3. *schnellaufender* (bis 1 500 U/min), nichtumsteuerbarer *Viertakt-Tauchkolbenmotor* mit Dieselbetrieb, der über Kupplung und Wende-Untersetzungsgetriebe auf die Propellerwelle wirkt oder als Antriebsmaschine in dieselelektrischen Anlagen genutzt wird. Die Mehrzahl der Dieselantriebsmotore ist mit Abgasturboaufladern versehen.

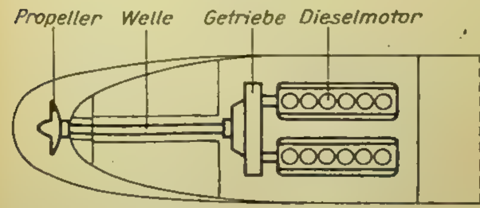
Dampfturbinenantrieb. Für Antriebsleistungen >20 MW kommen vorzugsweise Dampfturbinenantriebe in Frage, deren Höchstleistungen auf Seeschiffen bei ≈ 260 MW (Flugzeugträger) lie-



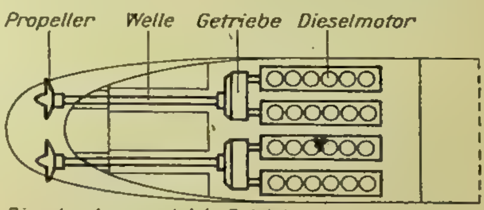
Dampfturbinenantrieb



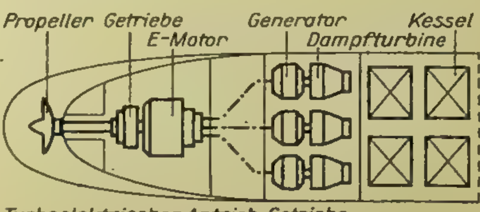
Dieselmotorenantrieb, direkt



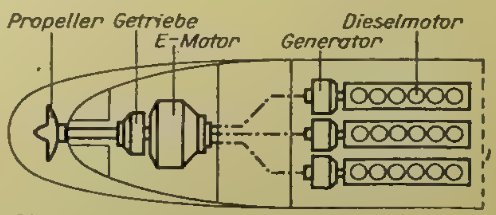
Dieselmotorenantrieb, Getriebe (Einschrauber)



Dieselmotorenantrieb, Getriebe (Zweischrauber)



Turboelektrischer Antrieb, Getriebe



Dieselelektrischer Antrieb, Getriebe

Abb. 16.3.1-7 *Schiffsantriebsanlagen*

gen. Die Anlage besteht aus *Wasserrohr-Dampfkesseln*, *Kondensator*, *Hochdruck-* und *Niederdruck-Dampfturbinen*, einer *Rückwärtsturbine*, *Sammel-Untersetzungsgetriebe* und *Wellenleitung* zum Propeller.

Gasturbinenantrieb. Gasturbinen (vgl. 2.6.3.) sind leichte, leistungsfähige, jedoch für den Schiffsbetrieb noch recht unwirtschaftliche Kraftmaschinen und deshalb bisher nur in seltenen Fällen, so z. B. bei Luftkissen- und Tragflügelschiffen, für den Schiffsantrieb genutzt, wobei hinsichtlich der Prozeßführung Gasturbinen mit offenem Kreislauf bevorzugt werden.

Elektroantrieb. Hierbei handelt es sich um Diesel- oder Turbogeneratoren, die elektrische Fahrmotoren mit Elektroenergie versorgen. Infolge der hohen Wirkungsgradverluste durch die doppelte Energieumwandlung sind diese Anlagen für normale Frachtschiffe nicht wirtschaftlich genug und deshalb nur auf wenigen Spezialschiffen anzutreffen.

Kernenergieantrieb. Mit der im Kernreaktor (vgl. 2.1.3.) freiwerdenden Wärme wird Wasser verdampft und mit dem Dampf eine Dampfturbine angetrieben. Eine andere Möglichkeit ist die, daß Gas bzw. Luft erhitzt und dann einer Gasturbine (Heißluftmaschine) zugeführt wird. Für die zivile Schiffahrt wurden beginnend mit dem sowjetischen Eisbrecher „Lenin" bisher 6 Schiffe mit Kernenergieantrieb, darunter 2 weitere sowjetische Eisbrecher („Arktika" und „Sibir"), in Betrieb genommen. In der Handelsschiffahrt hat sich dieser Antrieb noch nicht durchsetzen können.

Dampfmaschinenantrieb. Die am weitesten entwickelte Bauart war die Kolbendampfmaschine mit Abdampfturbine, die heute selbst in der Bestandsflotte nur noch selten, bei Neubauschiffen überhaupt nicht mehr anzutreffen ist.

Vortriebsmittel. Zum Vortrieb von Schiffen wird von einem Propulsionsmittel Wasser entgegengesetzt zur Fahrtrichtung beschleunigt, so daß eine Schubkraft zur Überwindung des Fahrtwiderstands entsteht. Am häufigsten ist der *Propeller* (*Schiffsschraube*) aus Gußeisen, Stahlguß, Bronze oder einer Sonderlegierung mit 2 bis 7 gewölbten Flügeln in Anwendung. Mit einem Propeller können auf Seeschiffen max. 35 MW übertragen werden. Bei größeren Leistungen sind 2 oder 3 Propelleranlagen erforderlich. Mehrpropelleranlagen haben auch Schiffe mit begrenztem Tiefgang. Vorherrschend ist der *Festpropeller* mit starren Flügeln. Bei *Verstellpropellern* kann der Anstellwinkel der Flügel verändert werden, so daß verschiedene Belastungsstufen wie auch die Umsteuerung zur Rückwärtsfahrt nur durch die Veränderung des Anstellwinkels bei konstanter Drehzahl der Hauptmaschine möglich sind.

Flügelradpropeller, die bekannteste Ausführung ist der *Voith-Schneider-Propeller*, bestehen aus einer im Schiffsboden eingebauten, um eine senkrechte Laufradachse rotierenden Scheibe mit senkrecht darauf angebrachten und ebenfalls um eine senkrechte Achse verstellbaren 4 bis 6 spatenförmigen Flügeln. Durch Regelung des Anstellwinkels der Flügel können Schubkraft und -richtung geändert werden, so daß weder Ruder noch eine Umsteuereinrichtung erforderlich sind. Mit Voith-Schneider-Propellern sind oftmals Schlepper, Schwimmkrane, Fähren u. a. ausgerüstet.

Schaufelräder mit festen oder beweglichen Schaufeln sind heute nur noch bei wenigen Binnenschiffen (Schlepper und Fahrgastschiffe) auf Flüssen mit häufig geringer Wasserführung, wie z. B. auf der Oberelbe, anzutreffen.

Wasserstrahlantrieb (*Hydrojet*) ist die Bezeichnung für einen Bootsantrieb, bei dem eine Kreiselpumpe Wasser ansaugt und durch eine Düse entgegengesetzt zur Fahrtrichtung ausstößt. Ist die Düse drehbar, so kann damit auch die Fahrtrichtungsänderung vorgenommen werden.

Schiffsgröße und -vermessung. Zur Bestimmung der Schiffsgröße werden verschiedene Maße herangezogen. Die *Hauptabmessungen* sind die linearen Maße für Länge, Breite, Höhe und Tiefgang. Der Tiefgang kann am Vor- und Hintersteven an *Tiefgangsmarken*, den *Ahmings*, in Dezimeter- bzw. Fußteilung abgelesen werden. Der Freibord ist durch eine *Freibordmarke* an der Bordwand mittschiffs erkennbar und wird für jedes Schiff nach internationalen Freibordvorschriften festgelegt. Die Freibordmarke gibt den zulässigen größten Tiefgang eines Schiffes an, wobei jahreszeitlich bedingte Unterschiede

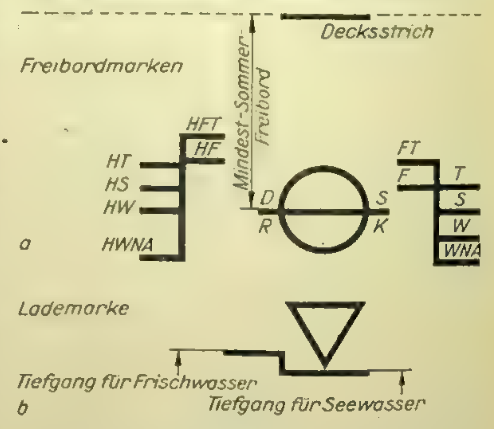


Abb. 16.3.1-8 *Freibord- und Lademarken: H = Holz-, S = Sommer-, W = Winterfreibord, WNA = Winternordatlantikfreibord (nur für Schiffe mit L = 100,58 m), F = Frischwasser-, T = Tropen-, FT = Frischwassertropenfreibord, DSRK = DDR-Schiffsrevision- und Klassifikation*

sowie Unterschiede im Fahrtgebiet und in der Dichte zwischen See- und Frischwasser berücksichtigt werden. Für Schiffe mit Holzdeckslasten gibt es einen besonderen *Holzfreibord*.
Mehrdeckschiffe (Stückgutfrachter) können unterhalb der Freibordmarke noch eine *Lademarke* haben (Abb. 16.3.1-8). Taucht das Schiff nicht tiefer als bis zur Lademarke ein, so kann für die Berechnung von Hafengebühren ein verringerter Wert der Schiffsvermessung angesetzt werden.
Das *Deplacement* gibt die Masse des vollbeladenen Schiffs in Tonnen an. Es ist das Produkt aus Wasserverdrängung, d. h. Volumen der vom Unterwasserschiffskörper verdrängten Wassermenge, und der Dichte des Wassers. Die *Tragfähigkeit* (engl. *deadweight*) ergibt sich als Differenz aus Deplacement und Schiffseigenmasse und gibt die Masse an, die das Schiff zu tragen fähig ist. Die *Gesamttragfähigkeit* (*deadweight all told*) beinhaltet alle Zuladungen zum leeren, betriebsklaren Schiff, d. h. Ladung, Treibstoffe, Schmierstoffe, Frischwasser, Proviant, Besatzung, Fahrgäste und Effekten.
Die *Ladefähigkeit* (*deadweight cargo*) ist die Aufnahmefähigkeit des Schiffs an frachtzahlender Ladung; sie stellt nur einen Teil der Tragfähigkeit dar. Deplacement und Tragfähigkeit werden in metrischen Tonnen und in englischen Sprachgebieten in long tons zu 1016 kg ausgewiesen. Für Schiffe mit großem Raumbedarf, wie Kühlschiffe und Flüssiggastanker, wird als Schiffsgröße meist der Laderauminhalt in Kubikfuß (100 cbf = 2,83 m^3) angegeben. Bei Containerschiffen dient dazu die Anzahl der Unterdeck- und der Deckscontainer und bei Roll-on-Roll-off-Schiffen die Decksstellfläche bzw. Stellänge auf der Basis von 20-Fuß-Containereinheiten. Das Verhältnis von Laderauminhalt zur Tragfähigkeit wird als *Räumte* (m^3/t) bezeichnet.
Traditionell bedingt wird die Schiffsgröße aller Typen immer noch in *Registertonnen* (RT) zu je 100 Kubikfuß = 2,83 m^3 angegeben. Als Raummaß soll die *Bruttoregistertonnage* (BRT) den gesamten Raum unter dem Vermessungsdeck sowie in den geschlossenen Aufbauten und die *Nettoregistertonnage* (NRT) den gewinnbringenden Nutzraum ausdrücken. Brutto- oder Nettoregistertonnage werden in Häfen und bei Kanalpassagen als Grundlage für die Gebührenfestlegung sowie für Schiffsklasseneinteilungen in internationalen Vorschriften, wie dem internationalen Schiffssicherheitsvertrag, genutzt.
Schiffsklassifikation. Mit der Schiffsklassifikation wird eine Beurteilung der Wertigkeit, des möglichen Fahrtbereichs und der Verwendungsmöglichkeit eines Schiffs vorgenommen. Alle bedeutenden Schiffbauländer haben eine *Klassifikationsinstitution*, in der DDR ist es die *DDR-Schiffs-Revision und -Klassifikation* (*DSRK*). Die von der DSRK klassifizierten Schiffe erhalten auf der Grundlage der von ihr herausgegebenen Vorschriften und der von ihr durchgeführten Bauaufsicht ein Klassezeichen, das sich aus verschiedenen Symbolen zusammensetzt. Über die Erteilung der Klasse wird ein *Schiffsklasseattest* ausgestellt. Durch Zwischenrevisionen muß die Klasse bestätigt, durch vierjährige Hauptrevision erneuert werden.
Grundlage der Kontrolltätigkeit der DSRK sind die jeweils gültigen, ständig dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik anzupassenden Vorschriften, die u. a. folgende Teile umfassen:
1. allgemeine Bestimmungen über die Aufsichtstätigkeit,
2. Vorschriften für die Klassifikation und den Bau von Seeschiffen mit ihren Teilen über Rohrleitungen, Schiffskörper, Ausrüstung und Einrichtung, Stabilität, Unsinkbarkeit, Brandschutz, Maschinenanlagen, Maschinen, Kessel und Druckbehälter, elektrotechnische Ausrüstung, Kühlanlagen, Werkstoffe und Elektroschweißung,
3. Vorschriften für die Ausrüstung von Seeschiffen nach internationalen Übereinkommen,
4. Vorschriften für den Freibord von Seeschiffen,
5. Vorschriften für Hebezeuge von Seeschiffen.

16.3.2. Seeschiffahrt

Unter *Seeschiffahrt* versteht man den Einsatz und Verkehr von Seeschiffen auf Küstengewässern und Meeren. Nach den Einsatzbereichen wird in Küstenschiffahrt, die innerhalb eines begrenzten Meeresteils (z. B. Ostsee oder Nordsee) erfolgt, und in Hochseeschiffahrt, die als transozeanischer Verkehr auf den Weltmeeren stattfindet, unterschieden.
Die Seeschiffahrt ist mit Ausnahme der Kabotagefahrt internationaler Verkehr, an den sich alle in einem beliebigen Staat registrierten und klassifizierten Schiffe beteiligen können. *Kabotagefahrt* nennt man den nationalen Seeverkehr zwischen den Häfen eines Landes, der für Länder mit langen Küsten (UdSSR, USA, Indien, VR China u. a.) von Bedeutung ist.
Zur Seeschiffahrt gehören die Flotten der Handelsschiffahrt, der Fischerei, der marinen Rohstoffgewinnung aus dem Meer, der technischen Dienste sowie der Landesverteidigung bzw. der Kriegsmarinen.
Seeschiffstypen (Tab. 16.3.2-1). ***Fahrgastschiffe*** dienen ausschließlich der Beförderung von Fahrgästen. Jedes Handelsschiff für den Gütertransport, das außerdem noch mehr als 12 Fahrgäste befördern darf, ist nach der Internationalen Konvention zum Schutz des menschlichen Lebens auf See als *Fracht-Fahrgastschiff* zu betrach-

ten. Fahrplanmäßiger Linienverkehr mit Fahrgastschiffen ist durch die Konkurrenz des Flugzeugs weitestgehend bedeutungslos geworden. Das neue Aufgabengebiet der Fahrgastschiffe besteht in *Kreuzfahrten* (Urlaubstouristik auf See). *Küstenfahrgast-* und *Seebäderschiffe* werden meist nur für Tagestouren eingesetzt. Für die Personenbeförderung in der Küstenfahrt verkehren in einigen Fällen bereits Tragflügelschiffe (z. B. an der Schwarzmeerküste der UdSSR) und Luftkissenschiffe (z. B. im Ärmelkanal zwischen Großbritannien und Frankreich, Tafel 64).

Tab. 16.3.2-1 *Einige bedeutende Schiffstypen der Welthandelsflotte (über 100 BRT)*

Schiffstyp	Anzahl	Mio BRT
Stückgutfrachter	21 681	75,3
Containerschiffe	507	7,6
Ro-Ro-Schiffe	635	3,0
Leichtertransportschiffe	28	0,8
Schüttgutfrachter	3 829	129,6
Kombinierte Schüttgut-Öl-Schiffe	419	48,3
Erdöl-Tanker	7 068	175,2
Chemikalien-Tanker	492	1,8
Flüssiggas-Tanker	602	14 Mm^3

Fährschiffe dienen der Beförderung von Eisenbahnwagen und Kraftfahrzeugen sowie der mit diesen reisenden Fahrgäste. Eisenbahnfährschiffe verfügen meist über ein Wagendeck mit 3 oder 4 Gleisen für 30 bis 45 Waggons oder einen D-Zug. Auto-Fahrgastfähren haben 2 oder mehr Fahrzeugdecks, auf denen 200 bis 400 PKW oder eine entsprechende Anzahl LKW bzw. Busse gestaut werden können.

Frachtschiffe dienen der Beförderung trockener oder flüssiger Güter über See und stellen den Hauptanteil an der Welthandelsflotte. Sie weisen eine zunehmende Spezialisierung auf.

Stückgutfrachtschiffe (Tafel 65) sind Mehrdeckschiffe mit 1 bis 3 Zwischendecks für die Beförderung aller Stückgutarten, wie Kisten, Fässer, Ballen, Säcke, Rollen, Paletten, Behälter, Fahrzeuge usw., sowie bedingt auch für Schüttgüter, insbesondere Getreide (Abb. 16.3.2-2). Stückgutschiffe sind allgemein mit bordeigenen Umschlageinrichtungen (Ladegeschirre, Bordkrane) ausgerüstet, um in Häfen, die nicht mit Kaikranen ausgestattet sind, die Güter laden und löschen zu können. Die Entwicklung geht zum „offenen Schiff" mit sehr breiten oder 2 bis 3 nebeneinander angeordneten Luken. Auch Seitenpforten in den Bordwänden sollen der Umschlagerleichterung dienen. Stückgutfrachtschiffe mit weniger als 1500 t dw haben meist kein Zwischendeck und werden als *Küstenmotorschiffe* (*Kümos*) bezeichnet.

Spezielle Stückgutfrachtschiffe existieren für den Transport von Holz, Papier, Vieh, Autos und für Schwergüter. *Spezialschwergutfrachter* haben Hebezeuge mit Tragkräften bis zu 8 MN und bzw. oder können über Rampen mit Schwerlasttransportern rollend be- und entladen werden.

Containerschiffe sind mit Zellengerüsten im Laderaum ausgestattete Frachtschiffe für den ausschließlichen Transport standardisierter Container (ISO-Container, vorwiegend 20 und 40 Fuß). Sie haben keine Zwischendecks. Sind nur einige Laderäume für den Containertransport geeignet, so spricht man von *Semicontainerschiffen*. Alle Containerschiffe müssen Container als Decksladung fahren, da sonst die Tragfähigkeit der Schiffe unzureichend ausgelastet wird. Die größten Containerschiffe können bis zu 3 000 Container (20 Fuß) aufnehmen, erreichen Geschwindigkeiten > 26 kn und besitzen keine bordeigenen Umschlaganlagen.

Roll-on-Roll-off-Schiffe werden meist über Heck-, seltener über Bugrampen rollend durch Fahrzeuge oder Flurfördermittel be- und entladen (Tafel 65). Die Schiffe haben Zwischendecks, die durch schiefe Ebenen oder Hubtische miteinander verbunden sind.

Leichtertransportschiffe, bekannt sind die Typen „LASH", „Seabee", „Bacat", dienen der Beförderung von Schwimmcontainern (vorherrschend bis zu 500 t), die mittels bordeigener Umschlageinrichtung (längsverfahrbarer Kran

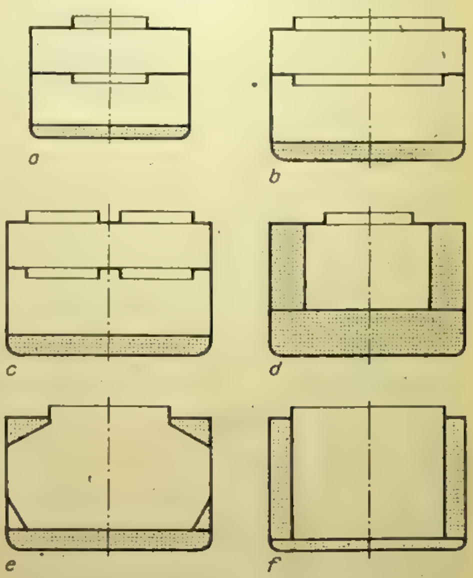


Abb. 16.3.2-2 *Laderaumquerschnitt von Trockenfrachtschiffen:* ***a*** *konventioneller Stückgutfrachter,* ***b*** *offenes Schiff mit Zentralluken und* ***c*** *mit Doppelluken,* ***d*** *Erzfrachter,* ***e*** *Bulkcarrier,* ***f*** *OBC-Carrier (Erz-Schüttgut-Container-Frachter)*

bzw. Hubplattform) am Heck aufgenommen bzw. zu Wasser gelassen werden. Die Schwimmcontainer (auch Leichter oder Bargen genannt) werden im Schiff wie Container gestaut und im Hafengewässer wie Schubprähme befördert.

Kühlschiffe sind Mehrdeckschiffe für den Transport verderblicher Ladung. Sie haben isolierte Laderaume und Kühlanlagen, für Laderaumtemperaturen im Bereich von +12 °C (Bananen) bis −25 °C (Gefrierfleisch). Die Kühlung erfolgt durch Zwangsumlauf gekühlter Luft und kann in den einzelnen Laderäumen für verschiedene Temperaturbereiche vorgenommen werden.

Schüttgutfrachter sind Eindeckschiffe für den Transport von Erz (Erzfrachter) oder verschiedensten Schüttgütern (*Bulkcarrier*). Die Laderäume der Erzfrachter sind entsprechend der hohen Dichte der Erze sehr klein, während Bulkcarrier große Laderäume für leichtere Schüttgüter brauchen. Kombinationen sind *Erz/Öl-Frachter*, die entweder im Laderaum Erz oder in den Seiten- und Bodentanks Erdöl fahren können (aber niemals gleichzeitig) und *OBO-Carrier* (engl. ore, bulk, oil), in deren Laderäumen Erz, andere Schüttgutladung oder auch Erdöl befördert werden kann. OBO-Carrier haben vereinzelt bereits Größen bis zu 280000 t dw erreicht. Allgemein liegt die Tragfähigkeit eines großen Teils der Bulkcarrier unter 60000 t dw, um den Panamakanal noch passieren zu können. *OBC-Carrier* (ore, bulk, container-Frachter) sind Eindeckschiffe zur Beförderung von Schüttgütern oder Containern.

Tankschiffe befördern flüssige Ladung in Tanks, die von der Schiffskörperhülle sowie Quer- und Längsschotten gebildet werden. Größte Bedeutung besitzen die *Erdöltanker*. Die größten haben bereits eine Tragfähigkeit von 550000 t dw und es gibt Pläne für den Bau von 600000-t-Tankern mit Nuklearantrieb. Die Einzeltankgrößen der Tankschiffe erreichen bis zu 50000 m^3. Beladen werden Tanker durch Pumpen an Land, während die Entladung durch die Bordpumpen des Tankers erfolgt, wobei Umschlagleistungen von 10000 bis 20000 m^3/h erreicht werden.

Produktentanker sind kleinere Tankschiffe (meist bis 20000 t dw) für die Beförderung verschiedenster Erdölerzeugnisse (weiße Ware). Spezialtanker existieren für Chemikalien, Bitumen, verflüssigten Schwefel, Leim, Farben, Wein, Whisky u. a.

Flüssiggastanker transportieren in isolierten kubischen, zylindrischen oder Membrantanks bei Normaldruck verflüssigte Gase. Das sind hauptsächlich Erdgase (LNG — *l*iquified *n*atural *g*as) bei −162 °C und Erdölgas (LPG — *l*iquified *p*etroleum *g*as) bei −42 °C. Nach der Verflüssigung durch Abkühlung nimmt LNG nur ≈ $^1/_{600}$ seines Volumens im gasförmigen Zustand ein. Die besonderen technischen Probleme dieses Schiffstyps bestehen darin, den Stahlschiffskörper vor den tiefen Temperaturen der Ladung zu schützen. Werkstoffe der Ladetanks sind meist Aluminiumlegierungen.

Fischereischiffe. Die Weltfischereiflotte umfaßt mit ≈ 12 Mio BRT (Anteil der RGW-Länder >50%) Schiffe verschiedenster Typen für Fischfang, -verarbeitung, -transport wie auch für Fischereiforschung und für Hilfszwecke.

Kutter sind Fangfahrzeuge bis ≈ 26,5 m Länge aus Holz oder Stahl für die Küsten- und Seefischerei und arbeiten mit Schleppnetzen. Ein *Seiner* ist ein kleineres Fischereifahrzeug für den Schlepp- und Treibnetzfang, besonders aber für die Ringwadenfischerei.

Logger sind Fangfahrzeuge bis ≈ 40 m Länge für die Treibnetzfischerei, haben aber an Bedeutung verloren. Kutter und Logger sind Seitenfänger, die einzeln oder paarweise (*Tucken*) arbeiten. Weiterentwicklungen dieser Schiffstypen sind die Heckfänger, die den *Steert* (mit Fischen gefülltes Schleppnetz) über eine Heckaufschleppe an Bord nehmen.

Trawler sind Fangfahrzeuge bis ≈ 60 m Länge für die Grundschleppnetzfischerei. Bei *Seitentrawlern* wird das Netz über steuerbords stehende Fischgalgen seitlich ausgesetzt und eingeholt. Als vorteilhafter haben sich Hecktrawler erwiesen, die über eine Heckaufschleppe das Netz aussetzen und einholen. Mit zunehmender Fangplatzentfernung gewinnen *Frosttrawler*, die den gesamten Fang ungeschlachtet einfrieren, und Fang- und Verarbeitungstrawler an Bedeutung.

Fang- und Verarbeitungstrawler sind vorwiegend über 100 m lange Heckfänger, wie z. B. der *Atlantik-Super-Trawler* aus der Volkswerft Stralsund. Sie fangen, verarbeiten und tieffrosten den Fisch. Diese Schiffe werden im Flottenverband mit Kühlschiffen oder auch autonom eingesetzt. Die Fischprodukte werden auf −25 bis −30 °C gefrostet in Kühlräumen an Bord gelagert. Schiffe dieses Typs werden auch *Fabriktrawler* genannt. *Transport- und Verarbeitungsschiffe* sind Fabrikmutterschiffe und arbeiten mit einer Fangflottille zusammen, von der sie den Frischfisch übernehmen, verarbeiten und in den Heimathafen transportieren. *Übernahme-Gefrier- und Transportschiffe* übernehmen den bereits von Fang- und Verarbeitungstrawlern zu Produkten verarbeiteten Fang und transportieren ihn in Tiefkühlladeräumen bzw. Laderäumen für Fischmehl und Tanks für Öl. Schiffe dieses Typs ähneln in ihrem konstruktiven Aufbau weitestgehend normalen Kühlfrachtschiffen. Das in der Seefischerei der DDR gebräuchlichste Fanggerät ist das *Schleppnetz* (*Trawl*) als *Grundschleppnetz* oder *pelagisches Schleppnetz*. Das Netz wird mittels zweier Trossen, den Kurrleinen, von einem Kutter oder Trawler durch das Wasser gezogen. Bei der *Einschiff-Schleppnetzfischerei* geben Scherbretter dem Netz seine horizontale

Öffnung, bei der *Zweischiff-Schleppnetzfischerei* wird die Öffnung des Netzes durch den seitlichen Abstand der Fahrzeuge bewirkt. Das *Grundschleppnetz* wird für den Fang der Fische eingesetzt, die sich am Meeresboden aufhalten. Für Fische, die sich in dichten Schwärmen im freien Wasser zwischen Meeresgrund und Oberfläche, dem Pelagial, aufhalten, wird das *pelagische Schleppnetz* angewendet, das in seiner Netzöffnung und Größe das Grundschleppnetz bei weitem übertrifft. Das pelagische Schwimmnetz kann auf die Wassertiefe gebracht werden, in der der Fischschwarm geortet wurde. Bei der *Ringwadenfischerei* wird ein in geringer Tiefe schwimmender Fischschwarm von einer bis zu 800 m langen, an einer Boje ausgesetzten und vom Fangfahrzeug um den Fischschwarm herangeführten Netzwand eingekreist. Die Netzwand wird unten zu einer Netzwanne zusammengezogen, so daß die Fische nicht mehr entweichen können. Die Ringwade wird mit riesigen mechanisch bedienten Keschern oder mit Fischpumpen entleert.

In der *Treibnetzfischerei* verwendet man bis zu 5 km lange und 14 m hohe, an Schwimmern hängende, mit dem Fangschiff verbundene und treibende Netzwände, in deren Maschen sich die Heringe mit ihren Köpfen verfangen.

Einem *Walfangmutterschiff* sind bis zu 25 Walfangboote zugeordnet, die zusammen eine Fangexpedition bilden. Walfangflotten haben vor allem die UdSSR, Japan und Norwegen. Die Walfangmutterschiffe haben umfangreiche Verarbeitungsanlagen und Tankräume für das in der Trankocherei gewonnene Öl.

Spezialschiffe. Schiffe der *technischen Flotte* sind alle zivilen Wasserfahrzeuge, die nicht zur Handels- oder Fischereiflotte gehören.

Schlepper werden in *Hafenschlepper* (kleine, wendige und zugkräftige Fahrzeuge zur Unterstützung der Seeschiffe beim Ein- und Auslaufen), in *Hochseeschlepper* (seetüchtige, leistungsstarke Fahrzeuge für das Schleppen von Schwimmdocks, -kranen, Erdölinseln usw. über See) und in *Bergungsschlepper* (wie Hochseeschlepper, jedoch zusätzlich mit leistungsfähigen Lenz- und Feuerlöschpumpen, Taucherausrüstungen u. a. Rettungsmitteln ausgerüstet) unterschieden.

Eisbrecher haben in der Schiffsaußenhaut, besonders am Bug, als Eisverstärkung dickere Platten sowie stärkere Längs- und Querfestigkeitsverbände. Typisch ist der im unteren Teil stark fliehende Bug, so daß sich der Eisbrecher auf die Eisdecke hinaufschieben kann, um diese durch seine Eigenmasse zu zerbrechen. Mitunter haben Eisbrecher auch zusätzlich Bugpropeller, durch deren Wirkung das gebrochene Eis vom Schiff weggeschwemmt wird. Weiterhin haben Eisbrecher Stampfanlagen für Längsschwingungen und Krängungsanlagen für Querschwingungen des Fahrzeugs, um somit die Wirkung beim Eisaufbruch zu erhöhen bzw. um das im Eis festsitzende Fahrzeug wieder zu lösen.

Weitere Schiffe der technischen Flotte sind *Feuerlösch-* und *Lotsenboote*, *Tonnen-* und *Seezeichenleger*, *Vermessungsschiffe*, *Seenotrettungskreuzer*, *ozeanografische Forschungsschiffe*, *Hebeschiffe*, *Kabelleger* und *Feuerschiffe*. Letztere sind verankerte, schwimmende Ansteuerungsseezeichen in Flußmündungen bzw. Meeresengen. Eine große Gruppe der technischen Flotte bilden die *Seebagger* und *Wasserbaugeräte*. Bei den Seebaggern ist zwischen *Seeeimerketten-* und *Hopperbaggern* (Saugbagger, die das Baggergut im eigenen Laderaum zur Klappstelle transportieren) zu unterscheiden.

Mit der Ausweitung der marinen Rohstoffgewinnung entstand eine Vielzahl neuer Typen der technischen Flotte, wie *Bohrschiffe*, *Rohrtransporter*, *Versorgungs-*, *Werkstattschiffe* u. a.

Schiffsnavigation dient der sicheren Führung des Schiffs an sein Ziel und basiert vor allem auf der Bestimmung des jeweiligen Standorts (Schiffsort) und Kurses.

Terrestrische Navigation ist die Navigation in Küstennähe bei klarem Wetter und guter Sicht. Der Schiffsort wird durch *Peilen* von in der Seekarte verzeichneten Festpunkten oder Seezeichen bestimmt.

Astronomische Navigation ist die auf hoher See bei klarem Wetter (ohne geschlossene Wolkendecke) und klarer Kimm übliche Standortbestimmung durch Messen von Gestirnshöhen über dem Horizont mittels des *Sextanten* nach der Chronometerzeit.

Funknavigation ist die Bestimmung des Schiffsorts nach Funkfeuern, -baken und -navigationssystemen, wie Decca, Consol, Loran u. a.; hierzu gehört auch die Radarnavigation (vgl. 11.4.6.).

Koppelnavigation nennt man die zeichnerische Darstellung der berechneten Kurse in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Schiffs über Grund (Koppelkurs, Log) in einer Seekarte. Der so gefundene Schiffsort, der *Koppelort*, kann aber vom wahren Schiffsort z. T. erheblich abweichen. Durch Vergleiche mit Orten aus terrestrischen, astronomischen oder funknavigatorischen Standlinien kann ein Standort gefunden werden, der dem wahren Schiffsort sehr nahe kommt (*Besteckrechnung*); auf großen Schiffen benutzt man hierfür mitunter einen mit Kreiselkompaß, Log und Chronometer elektronisch verbundenen selbsttätigen *Koppeltisch*.

Seezeichen. Schiffahrtswege, Grenzen der Fahrwasser, gefährliche Stellen und Schiffahrtshindernisse werden durch *Seezeichen* bzw. *Schiffahrtszeichen* markiert (Abb. 16.3.2-3). Auf den Seewasserstraßen der DDR übt der Seezeichendienst des *Seehydrographischen Dienstes* (*SHD*) der DDR die Kontrolle der festen und schwimmenden Seezeichen aus. Auf den Binnenwas-

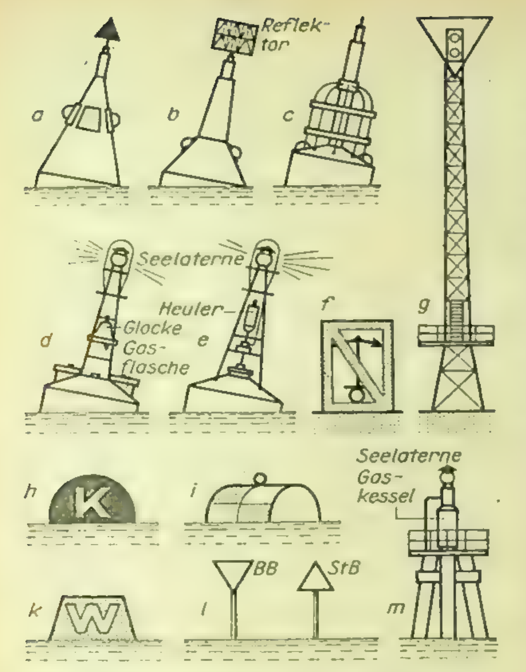


*Abb. 16.3.2-3 Schwimmende und feste Seezeichen: **a** Spitztonne (StB-Fw, Toppzeichen Kursänderung nach StB), **b** Spierentonne (BB-Fw, mit Radarreflektor), **c** Bakentonne (zum Kennzeichnen einer Ansteuerung, Abzweigung, Einmündung eines Fw o. a.), **d** Leuchtglockentonne, **e** Leuchtheultonne (zum Kennzeichnen einer Ansteuerung, Untiefe, eines Wracks o. a.), **h** Kugeltonne (schwarz, zum Kennzeichnen eines verlegten Kabels), **i** Faßtonne (rot-weiß, Festmachetonne), **k** Stumpftonne (grün, zum Kennzeichnen eines Wracks an BB), **f** Ankerverbotstafel (rot, am Ufer einer Binnenwasserstraße wegen Kabel, Rohrleitung o. a. unter Wasser), **l** Stangenseezeichen (Fw-Kennzeichnung in Binnenwasserstraßen), **m** Dalbenfeuer (an Fw-Grenze), **g** Richtfeuerbake (mit anderer Bake zum Kennzeichnen einer Fw-Achse). BB = Backbord, StB = Steuerbord, Fw = Fahrwasser*

serstraßen übernehmen diese Aufgabe die Wasserstraßenämter.
Feste Seezeichen haben eine feste Gründung an Land oder im Wasser; hierzu gehören *Leuchttürme* (mit Besatzung oder von einer Landstation aus überwacht), beleuchtete oder unbeleuchtete *Baken*, *Dalben-*, *Ufer-* und *Molenfeuer*, ferner *Nebelsignalanlagen* oder *Nautophone* (mehrere zu Schallwänden zusammengesetzte Signalhörner oder Typhone), *Funkfeuer* sowie passiv oder aktiv wirkende *Radarbaken* und in langen oder wichtigen Hafenzufahrten *Radar-Überwachungs-* oder *Leitsysteme*.

Schwimmende Seezeichen sind die auf See- und Binnenwasserstraßen am Grunde fest verankerten *Tonnen* und die *Feuerschiffe*. An besonderen Punkten (z. B. Ansteuerung) liegen *Bakentonnen* aus. Fahrwasser- und Bakentonnen können beleuchtet sein und tragen zu diesem Zweck eine elektrisch oder mit Gas gespeiste *Seelaterne* (*Leuchttonne*); Bakentonnen weisen mitunter statt dessen eine durch die Wellenbewegung zum Tönen gebrachte Glocke oder einen Heuler auf (*Glocken-*, *Heultonne*) oder Laterne und Signalgeber (*Leuchtglocken-* bzw. *Leuchtheultonnen*). Alle beleuchteten (befeuerten) Seezeichen bezeichnet man als *Leuchtfeuer* oder kurz *Feuer*. Sie werden nach der Intervallänge des gezeigten Lichts in *Fest-* (Dauerlicht), *unterbrochene*, *Blink-*, *Blitz-* und *Funkelfeuer* unterteilt. Als weitere Unterscheidungsmerkmale können die Feuer farbig (weiß, rot oder grün) oder nur in einer bestimmten Richtung (*Sektorenfeuer*) sichtbar sein. Jedes Leuchtfeuer hat seine bestimmte *Kennung* (Intervallordnung und Farbe), die im Verzeichnis der Leuchtfeuer und Signalstellen angegeben ist. Die gesamte Kennzeichnung eines Schiffahrtswegs mit Tonnen (einschließlich der Stangenseezeichen) nennt man *Betonnung*, die Gesamtheit der Leuchtfeuer an einem Weg *Befeuerung*.
Seewasserstraßen sind eindeutig begrenzte Schiffahrtswege in Strommündungen, Hafeneinfahrten, in Küstennähe und Haffen sowie Seekanäle. Zwangswege sind eindeutig vorgeschriebene Kurswege auf See, um den Schiffen Sicherheit (vor Minen nach dem 2. Weltkrieg bzw. vor Kollisionen in stark befahrenen Fahrtgebieten) zu gewähren. *Seestraßen* sind alle Hauptrouten der Seeschiffahrt in der offenen See. Sie sind weder begrenzt noch markiert. Der Schiffsverkehr innerhalb der Hoheitsgewässer der DDR unterliegt der *Seestraßenordnung* (*SSO*) und der *Seewasserstraßenordnung* (*SWO*) durch Vorschriften, Fahrregeln, Wegerechte, Licht- und Zeichenführung, Lotsenpflicht u. a.

Tab. 16.3.2-4 *Die größten Seekanäle*

Kanal	Bauzeit	Länge in km	Sohlenbreite in m	zulässiger Tiefgang in m
Suezkanal	1859/69	162,5	45...110	11,58 (geplant 13,20)
Panamakanal	1881/89 1904/14	81,7	90...150	11,0 (geplant 14,0)
Nordostseekanal	1887/95 1911/14	98,7	40...44	9,50 geplant 12,0)

Seekanäle (Tab. 16.3.2-4) sind künstlich geschaffene Schiffahrtswege für den internationalen Schiffsverkehr, um Häfen mit der offenen See oder Meere bzw. Meeresteile miteinander zu verbinden. Der *Suezkanal* ist ein schleusenloser *Meeresspiegelkanal*, der im Geleitzugsystem mit Ausweichstellen durchfahren wird. Der *Panamakanal* ist ein *Schleusenkanal*, dessen Scheitelhaltung 26 m über dem Meeresspiegel liegt. Der *Nordostseekanal* hat zwar Endschleusen (zum Ausgleich von Gezeitenunterschieden), ist aber eigentlich ein Meeresspiegelkanal.

Seehäfen sind geschützte Liege- und Umschlagplätze für Seeschiffe. Neben *Handelshäfen* für den Güterumschlag zwischen Seeschiffen und Binnentransportmitteln gibt es *Passagier-*, *Fähr-*, *Fischerei-*, *Marine-*, *Yacht-*, *Werft-* und *Schutzhäfen*.

Zu jedem Hafen gehören *Hafenzufahrt* (*Molen*, *Wellenbrecher*, *Seekanal*, *Fahrrinne*), *Hafenbecken* (*Liegeplätze* für Schiffe vor Anker, an Dalben, am Kai) und *Hinterlandverbindungen* (Eisenbahn-, Straßen-, Binnenschiffahrts-, Rohrleitungsanschluß). Die Benutzung der Seehäfen ist nach internationaler Übereinkunft Seeschiffen aller Nationen zum Zwecke des Güterumschlags, der Schiffsreparatur, der Schiffsversorgung oder als Nothafen bei Zahlung von Hafengebühren gestattet.

Im Einzugsbereich großer Seehäfen ist zunehmend die Ansiedlung einer hafengebundenen Industrie festzustellen. In Verbindung damit haben sich Teile der Handelshäfen bzw. einige Seehäfen vollständig zu *Industriehäfen*, Umschlagplätze für Erdölraffinerien, Hüttenwerke, Chemie- und Montanbetriebe, entwickelt.

Universalhäfen sind Handelshäfen für den Umschlag fast aller Gutarten. Aber auch in Universalhäfen, wie z. B. Rostock, gibt es Hafenbereiche, die für Schüttgüter, Erdöl, Eisen spezialisiert sind. Die Spezialisierung bezieht sich auf die umschlagtechnische Ausrüstung und die Lagerausstattung für die betreffenden Güter.

Transithäfen wickeln den Umschlag von Seehandelsgütern der Länder ab, die keine eigenen Seehäfen besitzen. So ist der Seehafen Rostock ein günstiger Transithafen für die ČSSR, für Ungarn und Österreich.

Freihäfen sind Bezirke mit Zollfreiheit in kapitalistischen Häfen, in denen für ein- und ausgelagerte Güter weder Ein- noch Ausfuhrzölle erhoben werden.

Wichtige Beurteilungskriterien für Handelshäfen sind die Jahresumschlagmengen, die Hafendurchlaufzeiten für die Seeschiffe sowie die minimale Fahrwassertiefe der Hafenzufahrt (danach richtet sich die maximal zulässige Größe der abzufertigenden Schiffe) und die Länge der Zufahrt.

Der Seehafen Rostock ist über eine nur 6 km lange Zufahrt zu erreichen. Die Fahrwassertiefe ist auf 13 m ausgebaggert und erlaubt Schiffen mit ≈ 50000 t dw den Hafen anzulaufen. Als Universalhafen mit spezialisierten Hafenbereichen ist der Rostocker Hafen mit modernen Umschlag- und Lageranlagen für Stückgut, Schüttgut, Holz, Südfrüchte, Getreide, Container, Schwergut ausgerüstet und verfügt auch über eine Roll-on-Roll-off-Anlage. Der Seehafen Wismar besitzt eine Umschlag- und Lageranlage für den Kaliexport und dient ferner dem Import von Getreide und Umschlag von Erdölprodukten. Im Seehafen Stralsund werden vorwiegend Küstenmotorschiffe des Nord-Ostsee-Verkehrs abgefertigt.

Betriebsformen der Seeschiffahrt. ***Trampschiffahrt*** ist an keine festen Routen und Transportgüter gebunden. Trampschiffe werden vom Versender der Ware (*Charterer*) zum einmaligen Transport einer homogenen Gutart (*Reisecharter*), für mehrere aufeinanderfolgende Reisen (*konsekutive Reisecharter*) oder auf bestimmte Zeit (*Zeitcharter*) gechartert. Sie transportieren in der Regel sporadisch zu verschiffende Massengüter, wie Getreide, Phosphate, Holz und Kohle, die jeweils als eine volle Schiffsladung verfrachtet werden. Der Anteil der Trampschiffahrt am Weltseeverkehr ist aber seit der Jahrhundertwende ständig zurückgegangen.

Linienschiffahrt ist fahrplanmäßiger Verkehr auf einer bestimmten Route (*Fahrtgebiet* oder *Relation*), der allen Verladern kleiner Partien von überwiegend Stückgütern offensteht.

Spezialschiffahrt ist die jüngste Betriebsform der Seeschiffahrt mit nach Gutart und Relation festgelegten Transportleistungen für bestimmte Wirtschaftszweige in langfristiger Bindung. Der Transport erfolgt mit auf die betreffende Gutart spezialisierten Schiffen, die sich entweder im Eigentum des Unternehmens (*Werkflotte*) befinden oder von diesem langfristig auf Zeit gechartert sind. Wichtige Arten sind die *Tankerfahrt*, die *Erzfahrt* und die *Kühlfahrt*, bei der vor allem die Bananenschiffahrt bedeutend ist. In jüngster Zeit hat sich international die Spezialschiffahrt von Automobilen, flüssigen Chemikalien, Zement, Flüssiggas, Zellulose u. a. Massengütern entwickelt.

16.3.3. Binnenschiffahrt

Als Transportzweig ist die Binnenschiffahrt Teil des Verkehrswesens eines Landes. Sie bewirkt, wie auch die übrigen Zweige des Transportwesens, die Ortsveränderung von Arbeitsmitteln, -gegenständen und -kräften in der Produktionssphäre, dient aber auch der Befriedigung individueller Bedürfnisse im Ausflugs- und Reiseverkehr.

Definiert ist Binnenschiffahrt als Schiffahrt auf Binnenwasserstraßen, d. h. Flüssen, Binnenseen

und -kanälen. Sie unterscheidet sich von der Seeschiffahrt primär durch das Fahrtgebiet; alle übrigen Unterschiede, vor allem in der Bauart der Fahrzeuge und deren Ausrüstung, der Betriebsart usw., sind sekundärer Natur und von den speziellen Bedingungen des Fahrtgebiets abhängig. Dabei sind die Schiffahrtsbedingungen auf großen Binnenseen denen auf kleinen Mittel- oder Randmeeren vergleichbar und stellen somit auch ähnliche Anforderungen an das Schiff wie die Küstenfahrt.

Der insbesondere in der UdSSR verbreitete kombinierte See-Binnen-Verkehr, d. h. der direkte Verkehr zwischen Binnen- und Seehäfen an den europäischen, nordafrikanischen und vorderasiatischen Küsten, erfordert Schiffe, die beiden Einsatzbedingungen genügen.

Die Verkehrs- und volkswirtschaftliche Bedeutung der Binnenschiffahrt in den einzelnen Ländern ist unterschiedlich; sie hängt insbesondere von der Dichte und Durchlaßfähigkeit der vorhandenen Wasserstraßen ab. Die absolut höchsten Transportleistungen werden in der UdSSR und den USA erbracht – in der UdSSR werden über 500 Mt/Jahr befördert und über 230 Gtkm/Jahr geleistet –, die relativ höchsten in den Niederlanden, wo die Binnenschiffahrt ein Mehrfaches der Transportleistung der Eisenbahn erbringt.

Verkehrsarten in der Binnenschiffahrt sind die *Fracht-* und die *Fahrgastschiffahrt*; daneben haben der *Fährbetrieb* und die *Flößerei* eine regional beschränkte Bedeutung. Die Fahrgastschiffahrt dient überwiegend dem Touristen- und Ausflugsverkehr in landschaftlich reizvollen Strom- und Seengebieten, insbesondere im Bereich von Erholungszentren und Großstädten. In der Personenbeförderung über größere Strecken ist die Fahrgastschiffahrt regional wettbewerbsfähig, soweit sie schnelle Fahrzeuge, wie Tragflächenboote oder Bodeneffektfahrzeuge, einsetzt. Der Fährbetrieb für Personen und Fahrzeuge ersetzt dort Landverbindungen, wo das geringe Verkehrsbedürfnis die Überbrückung bzw. Untertunnelung von Wasserläufen nicht rechtfertigt. Die Flößerei ist in der Regel auf von der Schiffahrt sonst nicht genutzte Flußläufe mit hinreichender Strömungsgeschwindigkeit in siedlungsmäßig wenig erschlossenen Waldgebieten beschränkt, z. B. in Kanada und Sibirien.

In der Frachtschiffahrt werden unterschieden: *Binnenverkehr* innerhalb der Landesgrenzen, *grenzüberschreitender Verkehr*, *Kabotage* als Verkehr eigener Schiffe zwischen Häfen eines anderen Landes bzw. anderer Länder, *Transitverkehr* fremder Schiffe zwischen Häfen anderer Länder unter Benutzung eigener Wasserstraßen.

Betriebsarten. In der Frachtschiffahrt werden verschiedene Betriebsarten unterschieden (Abb. 16.3.3-1).

Selbstfahrerbetrieb: Antriebsanlage und Transportraum sind in einem Fahrzeug vereint.

Schleppbetrieb: Ein Triebfahrzeug, der *Schlepper*, zieht ein bzw. mehrere Lastfahrzeuge, die *Schleppkähne*, im „*Schleppzug*".

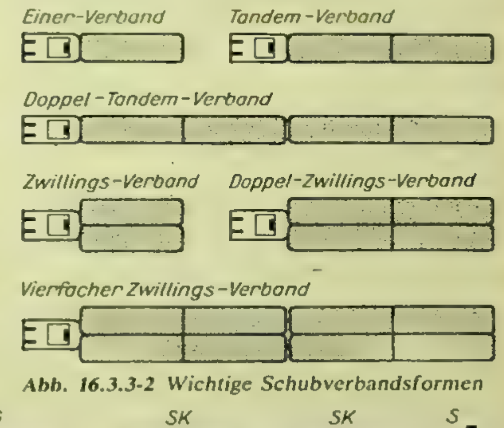


Abb. 16.3.3-2 *Wichtige Schubverbandsformen*

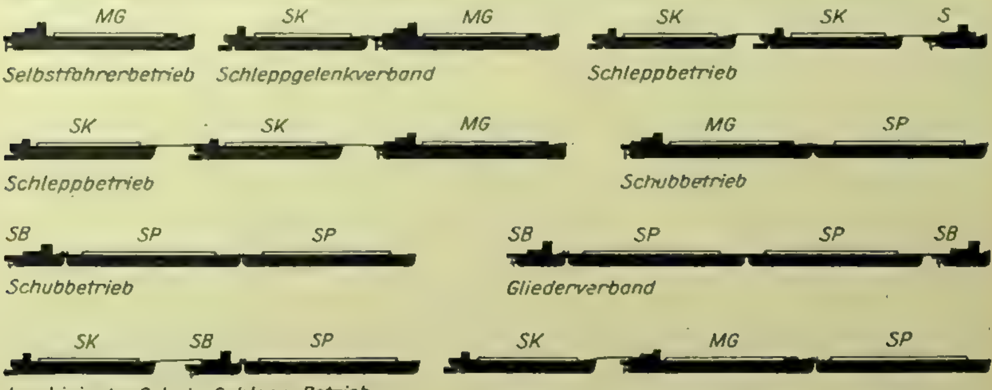


Abb. 16.3.3-1 *Betriebsarten der Binnenschiffahrt*

Schubbetrieb: Ein Triebfahrzeug, das *Schubschiff*, schiebt ein bzw. mehrere Lastfahrzeuge, die *Schubprähme*, im „*Schubverband*" (Abb. 16.3.3-2).

Neben diesen 3 „reinen" Betriebsarten gibt es vielfältige Kombinationen, z. B. schleppende bzw. schiebende Selbstfahrer, Schleppzüge, in denen der zum Schieben ausgerüstete Schlepper („Schubschlepper") auch einen Prahm schiebt, und Schubverbände, in denen das zum Schleppen ausgerüstete Schubschiff auch einen Schleppkahn („Anhang") zieht.

Die zulässige Größe der einzelnen Fahrzeuge sowie der Schleppzüge und Schubverbände richtet sich nach den Parametern der jeweiligen Wasserstraße und ist gesetzlich in den nationalen Verkehrsvorschriften limitiert.

Binnenschiffstypen. Nach der Funktion können unterschieden werden:

– Schiffe der Gütertransportflotte,
– Fahrgastschiffe,
– Fährschiffe für Personen, Straßen- und Schienenfahrzeuge,
– Versorgungsschiffe (Bunker- und Proviantboote, in der UdSSR auch „schwimmende Warenhäuser"),
– Fahrzeuge der sog. technischen Flotte, wie Bagger, Spüler, Schuten, Eisbrecher, Bergungsfahrzeuge u. a.,
– Dienst- und sonstige Spezialfahrzeuge, wie Inspektions- und Bereisungsboote, Boote der Wasserschutzpolizei, Feuerlöschboote u. a.

Die Vielfalt der Schiffstypen der Gütertransportflotte resuliert aus den unterschiedlichen Bedingungen der Wasserstraßen, die im wesentlichen die äußeren Abmessungen (Länge, Breite, Höhe und Tiefgang) und die Antriebsleistung bestimmen, und den transport- und umschlagstechnischen Eigenschaften der Transportgüter. Da Schlepper und Schleppkähne nur noch vereinzelt gebaut werden und auch in den Bestandsflotten nur eine untergeordnete Rolle spielen, sollen hier lediglich die wichtigsten Schiffstypen des Selbstfahrer- und Schubbetriebs behandelt werden.

Selbstfahrer sind (je nach Klasse) reine Binnenschiffe und für die Fahrt in küstennahen Gewässern zugelassen oder (begrenzt) seegängig. Insbesondere die UdSSR verfügt über eine große Anzahl seegängiger Motorgüterschiffe vom Typ „Baltiskij" und „Wolgo-Balt".

Motorgüterschiffe sind Einraumschiffe, die jede Art von Massen- und Stückgut fahren können, aber auch gute Bedingungen für den Transport von Containern und Schwergut bzw. sperrigem Gut (insbes. Industrieausrüstungsteile) bieten. Es sind in der Regel Zweihüllenschiffe, d. h. mit Stahldoppelboden und doppelten Seitenwänden (Wallgang) in konventioneller, z. T. auch in Pontonform ausgeführt. Der Antrieb erfolgt durch schnell- oder mittelschnell laufende Dieselmotoren, die vom Ruderhaus aus bedient werden. Der Maschinenraum ist, wie auch auf Seeschiffen, für eine bestimmte Zeit – mindestens 16 h – wachfrei. Radar und UKW-Funk gehören zur Standardausrüstung. Die Dienstgeschwindigkeit beträgt im unbeschränkten Wasser meist 14 bis 20 km/h.

Neben dem Motorgüterschiff mit offenem, durch Roll- oder Faltlukendeck schließbarem Laderaum gibt es (insbes. in der UdSSR) auch Glattdeckschiffe, die die Ladung (meist Naßkies bzw. Container oder Stückgut) an Deck fahren.

Motortankschiffe haben ein geschlossenes Deck und fahren die Ladung, auf die sie spezialisiert sind, z. B. Erdölerzeugnisse, Chemikalien, Wein u. a., in Ladetanks. Tankschiffe, die Heizöl fahren, erhalten in der Regel Aufheizvorrichtungen. Andere hochspezialisierte Motorgüterschiffe sind für den Transport von Kühlladung mit Kälteanlagen ausgestattet.

Schubschiffe (Abb. 16.3.3-3) haben, vor allem bei begrenzter Länge des Schubverbands, meist einen pontonförmigen Schiffskörper (Tafel 64),

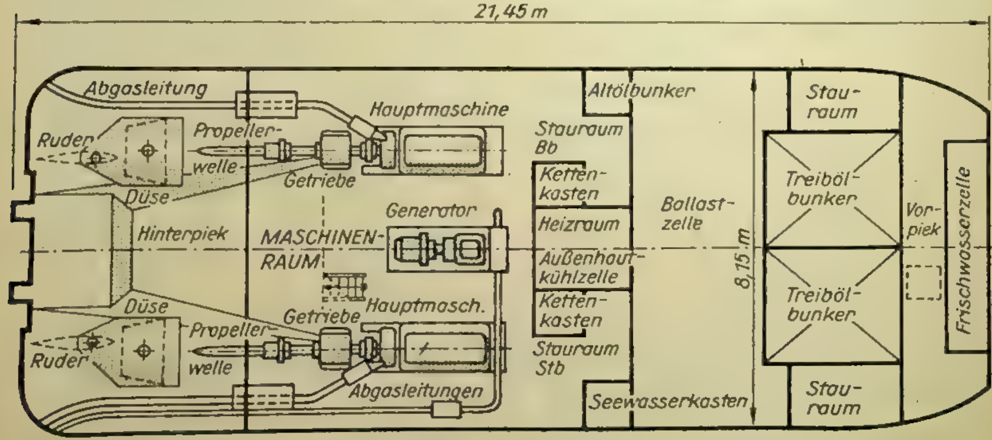


Abb. 16.3.3-3 Unterdeck eines Schubschiffs

zuweilen aber auch eine konventionelle Schiffsform ähnlich einem Schlepper (*Schubschlepper*). Da die Antriebsanlage auf möglichst kleinem Raum untergebracht und auf Flachwasserströmen ein minimaler Tiefgang angestrebt werden muß, werden in der Regel schnellaufende Dieselmotoren geringer Leistungsmasse verwendet. Die Antriebsleistung ist abhängig von der Wasserstraße (Breite, Tiefe, Strömungsgeschwindigkeit) und der Verbandsgröße; sie reicht von ≈ 75 kW auf Nebenwasserstraßen bis zu ≈ 2,2 MW auf den Binnenwasserstraßen der UdSSR, ≈ 4 MW auf dem Rhein und max. 8 MW auf den größten nordamerikanischen Strömen. Am Bug befinden sich die sog. *Schubschultern* als Widerlager für die Schubprähme, die i. allg. mittels Trossen und Winden, z. T. auch mit Hilfe halbautomatischer Schloß- u. a. Patentkupplungen, vorgespannt werden. Vor allem große Schubschiffe sind in der Regel mit festen Düsen ausgerüstet und haben außer den Hochleistungs-Hauptrudern vor den Düsen angeordnete Flankenruder, die eine bessere Manövrierfähigkeit bei Rückwärtsfahrt gewährleisten. Kleine Schubschiffe, vereinzelt auch große mit Mehrmotorenanlage, sind z. T. mit Ruderpropellern (Z-Antrieb), besonders flachgehende auch mit Wasserstrahlantrieben, ausgerüstet. Da Schubschiffe überwiegend durchgehend im Mehrschichtbetrieb eingesetzt sind, ist der Mechanisierungs- bzw. Automatisierungsgrad meist höher als bei Selbstfahrern. Das relativ kleine Schiff mit hoher Leistungskonzentration erfordert ferner besondere Maßnahmen zur Geräuschdämmung und Körperschallisolierung, um die vorgeschriebenen Limite in Wohnblocks, Wirtschaftsräumen und Steuerhaus einzuhalten.

Schubprähme, die häufig einzeln befördert werden, haben meist Pontonform. Um integrierte, d. h. formschlüssige Verbände bilden zu können, wird häufig ein vertikaler Heckspiegel vorgesehen; zur formschlüssigen Kupplung im Verband werden auch quaderförmige Prähme (Zwischensektionen) verwendet, die wegen ihres hohen Widerstands einzeln nur im Bugsierbetrieb verholt werden können. In der konstruktiven Konzeption unterscheiden sich Schubprähme kaum vom Motorgüterschiff. Auch hier dominiert der Zweihüllen-Einraum-Prahm, der jedoch in der Regel nur mit Lukendeck ausgerüstet wird, wenn feuchtigkeitsempfindliches Gut, wie Getreide, Kali u. a., gefahren wird. Die Kupplungseinrichtung entspricht dem Schubschiff. Der Einsatz von Schubverbänden auf großen Binnenseen, Seewasserstraßen und Seestraßen stellt besondere Anforderungen an die Kupplung; praktiziert werden sowohl absolut starre als auch Eigenbewegungen von Schubschiff und Prahm gestattende Systeme. Die Buganker können häufig vom Schubschiff aus gefiert werden. Bei Einsatz auf engen Wasserstraßen werden (vom Schubschiff fernbediente) passive oder auch aktive Bugruder benutzt, um die Manövrierfähigkeit des Verbands zu erhöhen. Schubprähme sind weitgehend auf bestimmte Ladungsgüter spezialisiert.

Glattdeckprähme sind für den Naßkies-, Container- und Schwerguttransport vorgesehen und z. T. für die Roll-on-Roll-off-Beladung eingerichtet.

Tankprähme entsprechen in ihrer Auslegung dem Motortankschiff.

Eine besondere Kategorie bilden die auf speziellen Trägerschiffen über See beförderten Prähme, die im Seehafen zu Wasser gelassen bzw. an Bord genommen werden. Am verbreitetsten sind die Systeme „LASH" (*l*ighter *a*board *sh*ips) und „Seabee". Der Effekt besteht in einer drastischen Verkürzung der Hafenliegezeit des Seeschiffs und in der Möglichkeit des Haus-Haus-Verkehrs, sofern Versender und Empfänger über Binnenwasserstraßenanschluß verfügen.

Fahrgastschiffe weisen eine große Typenvielfalt auf. Nach der Reisedauer können unterschieden werden: Fahrgastschiffe für den Nah-, insbesondere Fährverkehr (in der Regel ohne Restauration und sanitäre Anlagen), Fahrgastschiffe für den Tagesausflugs- und -linienverkehr (mit mehr oder weniger umfangreichen gastronomischen Einrichtungen) und Kabinenschiffe für den Langstrecken- und Touristenverkehr. Nach der Art der Fortbewegung unterteilt man in Verdrängungsschiffe, Tragflächenboote und Bodeneffektfahrzeuge.

Verdrängungsschiffe tauchen den gesamten Schiffskörper bis zur Konstruktionswasserlinie ein. Sie stellen die konventionellen Fahrgastschiffe dar, die Dienstgeschwindigkeiten zwischen 15 und 25 km/h erreichen. Der Antrieb ist meist als Schraubenantrieb, auf Strömen mit häufig geringer Wasserführung auch als Seitenradantrieb ausgeführt.

Tragflächenboote werden durch den dynamischen Auftrieb an Tragflächen, die vorn und hinten unter dem Schiffsboden angebracht sind, aus dem Wasser gehoben (Tafel 64). Das Schiff gleitet auf den Tragflächen über das Wasser und erreicht Geschwindigkeiten von ≈ 50 bis 120 km/h.

Bodeneffektfahrzeuge (*Luftkissenschiffe*, Tafel 64) schweben auf einem von einem Gebläse erzeugten Luftpolster ≈ 0,2 bis 0,5 m über dem Wasser (oder dem Land). Da der Wasserwiderstand völlig ausgeschaltet wird, erreichen Luftkissenschiffe Geschwindigkeiten bis 150 km/h. Den Vortrieb erhalten sie von Luftschrauben, die Steuerung durch Leitwerke (vgl. 16.4.3.).

Binnenwasserstraßen sind alle schiffbaren Flußläufe, Kanäle und Binnenseen, soweit diese von der Schiffahrt genutzt werden. Die Grenze zwischen Binnen- und Seewasserstraßen in Flußmündungsgebieten, die „*Seegrenze*", wird ge-

setzlich festgelegt; sie ist von Bedeutung, weil auf Binnenwasserstraßen andere Verkehrsvorschriften gelten als auf Seewasserstraßen. So wie Seeschiffe auf großen Strömen tief ins Binnenland fahren, können auch Binnenschiffe entsprechender Klasse in begrenztem Umfang auf Seewasserstraßen verkehren.
Da es kein allgemeingültiges Kriterium der *Schiffbarkeit* gibt und die Zuordnung von Wasserläufen zur Kategorie der (schiffbaren) Wasserstraßen regional unterschiedlich erfolgt – häufig werden in der Statistik auch Begriffe, wie „dem allgemeinen Verkehr dienende Wasserstraßen" oder „regelmäßig benutzte Wasserstraßen", verwendet –, ist der übernationale Vergleich nicht klassifizierter Wasserstraßennetze problematisch.
Unterschieden werden *natürliche* und *künstliche Binnenwasserstraßen*, je nachdem, ob der Wasserweg als Fluß oder Binnensee von Natur gegeben ist oder ob er als Kanal erbaut wurde.
Nur wenige große Ströme und Seen gestatten ohne menschlichen Eingriff eine ungehinderte Schiffahrt. In der Regel bedürfen sie zwecks Gewährleistung günstiger und stabiler Schiffahrtsbedingungen
– der Beseitigung bzw. Minderung verkehrsfeindlicher Engstellen, Untiefen, Geschiebeablagerungen usw.,
– bei unzureichender Wasserführung der Laufregelung, häufig im Zusammenhang mit einer Bereitstellung von Zuschußwasser aus Talsperren,
– z. T. der Stauregelung oder Kanalisierung mittels Einbau von Stauhaltungen, wie Wehre und Schleusen.
Im Gegensatz zu begrenzten und lokalisierten Maßnahmen zur Verbesserung der Schiffahrtsbedingungen betreffen Laufregelung – Beseitigung von Stromspaltungen, Ausführung von Durchstichen, Abflachung von Krümmungsradien, Verbauen von Übertiefen, Beseitigung von Mindertiefen durch Baggerungen, Errichten von Längs- und Querbauten, wie Dämmen, Deck- und Leitwerken, Buhnen usw. – und Staurege-

Tab. 16.3.3-4 *Natürliche Wasserstraßen Europas*

Wasserstraße	Abschnitt	Länge in km	Ausbauart	Anzahl der Staustufen
Donau	Sulina–Galați (Mündungsgebiet)	150	für Seeschiffe	–
	Galați–Turnu Severin (Unterlauf)	780	teilreguliert	–
	Turnu Severin–Moldowa Veche	119	teilkanalisiert	1
	Moldowa Veche–Gönyü (Mittellauf)	742	teilreguliert	–
	Gönyü–Regensburg (Oberlauf)	588	teilkanalisiert	4
Rhein	Hoek van Holland–Bonn (Niederrhein)	375	reguliert	–
	Bonn–Bingen (Mittelrhein)	127	reguliert	–
	Bingen–Basel (Oberrhein)	360	teilkanalisiert	8
	Basel–Rheinfelden (Hochrhein)	20	teilkanalisiert	2
	Rheinfelden–Konstanz (Hochrhein)	148	Ausbau geplant	6
Elbe	Brunsbüttelkoog–Hamburg	72	für Seeschiffe	–
	Hamburg–Grenze DDR/ČSSR	623	reguliert	1
	Grenze DDR/ČSSR–Kolín	191	kanalisiert	20
Oder	Mündung–Szczecin	36	für Seeschiffe	–
	Szczecin–Kostrzyn	120	reguliert	–
	Kostrzyn–Brzeg Dolny	330	reguliert	–
	Brzeg–Dolny–Koźle	168	kanalisiert	23
	Koźle–Racibórz	46	reguliert	–

Tab. 16.3.3–5 *Klasseneinteilung der Binnenwasserstraßen*

Klasse	befahrbar für Schiffe mit einer Tragfähigkeit in t von ··· bis	entspricht dem konventionellen Schiffstyp auf europäischen Wasserstraßen	Tragfähigkeit in t	*L* in m	*B* in m	*T* in m	H_{fix} in m	empfohlene Abmessungen für Schubverbände *L*; *B* in m
0	50···< 250	–	–	–	–	–	–	–
I	250···< 400	Peninche	300	38,50	5,00	2,20	3,55	–
II	400···< 650	Kempenaar	600	50,00	6,60	2,50	4,20	135; 12 148; 11
III	650···<1 000	Dortmund-Ems-Kanal-Kahn	1 000	67,00	8,20	2,50	3,95	200; 11,4 200; 22,8
IV	1 000···<1 500	Rhein-Herne-Kanal-Kahn	1 350	80,00	9,50	2,50	4,40	200; 11,4 200; 22,8
V	1 500···<3 000	großer Rhein-Kahn	2 000	95,00	11,50	2,70	6,70	230; 23 230; 28
VI	≧3 000	–	–	–	–	–	–	230; 28

lung größerer Abschnitte bzw. auch den gesamten Strom (vgl. 15.10.5., 15.10.6.).
Die bedeutendsten, mehrere Länder durchströmende bzw. tangierende natürlichen Binnenwasserstraßen Europas sind, in der Reihenfolge ihrer schiffbaren Länge, Donau, Rhein, Elbe und Oder (Tab. 16.3.3-4).
Binnenschiffahrtskanäle dienen der Verbindung natürlicher Wasserstraßen miteinander oder der regionalen Erschließung von Gebieten mit großem Verkehrsbedarf für die Binnenschiffahrt. Unterschieden werden Scheitel-, Seiten- und Stichkanäle. *Scheitelkanäle* überwinden die Wasserscheide zwischen 2 Stromgebieten, wobei die höchste Haltung als Scheitelhaltung bezeichnet wird. Von dieser führen Schleusentreppen oder auch durch Schiffshebewerke verbundene Haltungen bis zur Einmündung in die natürlichen Wasserstraßen. *Seitenkanäle* folgen dem Lauf eines Flusses auf der Talsohle oder auf einem benachbarten Höhenrücken. Sie bieten häufig eine verkehrstechnisch und wirtschaftlich vorteilhafte Alternative zur Lauf- oder Stauregelung des Flusses. *Stichkanäle* schließen in der Regel ein unweit einer vorhandenen Wasserstraße gelegenes Verkehrsaufkommensgebiet an diese an.
Die Bestrebungen um die Schaffung eines weiträumigen Wasserstraßennetzes erforderten sowohl für die Staaten des RGW als auch die westeuropäischen Staaten eine Klasseneinteilung der Binnenwasserstraßen als Ordnungssystem sowie die Erarbeitung von Normativen für den Ausbau aller Wasserstraßen von internationaler Bedeutung (Tab. 16.3.3-5). Diese müssen der Klasse IV entsprechen, also für Schiffe mit einer Tragfähigkeit $\geqq 3000$ t befahrbar sein. Bei der Projektierung neuer Wasserstraßen sollen die Sohlenbreite bei einer mittleren nutzbaren Fahrwassertiefe von 3,50 m mindestens 28 m und die lichte Brückenhöhe über HSW (höchster schiffbarer Wasserstand) mindestens 5,25 m betragen. Als nutzbare Mindestabmessungen der Schleusenkammern werden 85 m × 12 m gefordert.
Binnenhäfen haben als Verkehrsknotenpunkte vielfältige Aufgaben, die von der wirtschaftlichen und räumlichen Struktur des engeren und weiteren Hinterlands und den Verkehrsbedürfnissen bestimmt werden. Historisch sind 3 Haupttypen von Binnenhäfen entstanden: der *Umschlag-* und *Durchgangshafen* im kombinierten Verkehr (Binnenschiffahrt–Eisenbahn bzw. Kraftverkehr), der *Handels-* und *Versorgungshafen* und der *Werkhafen*, der ausschließlich den Verkehrsbedürfnissen eines Betriebs dient. Daneben gibt es kleinere *Ladestellen* zur Befriedigung lokaler oder saisonbedingter Umschlagsbedürfnisse.
Öffentliche Häfen erfüllen meist 3 Funktionen: Umschlag, Lagerei und Hafenbahnbetrieb. Beim Umschlag werden der *direkte Umschlag* zwischen Schiff einerseits und Waggon, LKW, Schiff

andererseits und der *indirekte Umschlag*, bei dem das Transportgut im Hafen zwischengelagert wird, unterschieden. Neben dem sog. Wasserumschlag (über Kaikante), spielt in vielen Häfen der Landumschlag zwischen Waggon bzw. LKW und Lager eine große Rolle. Insbesondere in den Handels- und Versorgungshäfen, z. B. Magdeburg, werden häufig zahlreiche Industriebetriebe über die Hafenbahn bedient.
Anlage und Ausrüstung der Binnenhäfen richten sich nach den Aufgaben. Je spezieller die Umschlagaufgaben, desto spezialisierter kann auch die technische Ausrüstung sein. So werden bei massenhaftem Umschlag Waggon–Schiff Waggonkipp- (vgl. 16.1.7.) bzw. Bandanlagen in Verbindung mit Selbstentladewaggons eingesetzt. Der Umschlag von Getreide und staubförmigem Gut erfolgt in der Regel mittels pneumatischer Förderanlagen (vgl. 10.3.2.), Erdöl oder anderes flüssiges Gut wird über Rohrleitungen umgeschlagen.
Bei universellen Umschlagaufgaben ist der elektrisch betriebene Portalkran mit einer Tragkraft von 30 bis 100 kN, in Sonderfällen auch bis zu 300 kN, mit Wipp- oder Verstellausleger für 20 bis 30 m Ausladung das wirtschaftlichste Mehrzweckgerät. Bauart und Größe der Krane werden bestimmt durch
– Umschlagart (Schiff-Lager/Waggon/LKW/Schiff usw.),
– Umschlagtechnologie (Einsatz von Zusatzgeräten, wie Trichter bzw. Bunker und Förderbänder),
– Größe der abzufertigenden Schiffe,
– Art (Greifer- bzw. Hakengut) und Menge des Umschlagguts,
– bauliche Gegebenheiten (Böschung, Ladestraße, Belastbarkeit der Kais usw.).
Daneben werden, vorrangig im Landumschlag, Raupen- und Eisenbahndrehkrane sowie auch andere Mobilkrane eingesetzt (vgl. 10.6.2.).

16.4. Luftfahrttechnik – Luftverkehr

16.4.1. Luftfahrzeuge

Luftfahrzeuge sind Fahrzeuge, die sich innerhalb der Lufthülle der Erde in einem Höhenbereich von ≈ 5 m bis 50 km bewegen. Sie können nach der Art der Auftriebserzeugung (Abb. 16.4.1-1), dem Verwendungszweck, der Bauweise oder der Antriebsart systematisiert werden.
Verkehrs- und Transportflugzeuge ermöglichen den sicheren und schnellen Transport von Personen und Gütern über Entfernungen bis zu 10^4 km. Bei den gegenwärtig größten Typen wird eine Kapazität von nahezu 500 Passagieren oder

100 t Nutzlast erreicht. Die Abflugmasse erreicht 350 t. Die Reiseflughöhe für Unterschallflugzeuge liegt bei 11 km, die Reisegeschwindigkeit zwischen 800 und 900 km/h. Verkehrs- und Transportflugzeuge besitzen moderne Navigations- und Klimaanlagen, Flugregler und leistungsfähige Antriebsanlagen. Für ihren ökonomischen Einsatz sind umfangreiche Bodenanlagen und organisatorische Vorbereitungen erforderlich (vgl. 16.4.5.). Entsprechend ihrer konstruktiven Auslegung für eine bestimmte Reichweite kann man Verkehrs- und Transportflugzeuge in 3 große Gruppen einteilen.

Kurzstreckenflugzeuge für Entfernungen bis 10^3 km sind kleine und mittelgroße Flugzeuge mit Kolbenmotoren (vgl. 2.6.2.), PTL-Triebwerken (vgl. 16.4.2.) oder Strahltriebwerken. Sie dienen sowohl als Zubringerflugzeuge für die großen interkontinentalen Flughäfen als auch als bequemes und schnelles Verkehrsmittel zwischen benachbarten Großstädten, auf Linien also, die mit hoher Frequenz beflogen werden. Diese Flugzeuge zeichnen sich durch geringe Umkehrzeiten (Zeit zwischen Landung und Start) bis zu 20 min aus.

Mittelstreckenflugzeuge für Entfernungen von 1000 bis 3000 km sind mittlere bis große Flugzeuge mit PTL- oder Strahltriebwerken. Diese Flugzeuge stellen zahlenmäßig den Hauptanteil der Flotten dar. Gegenwärtig vollzieht sich bei dieser Kategorie der Übergang zum strahlgetriebenen Großraumflugzeug mit ≈ 300 Passagieren und hohem Reisekomfort.

Langstreckenflugzeuge für Entfernungen von > 3000 km sind große Flugzeuge, die nahezu ausschließlich mit 3 oder 4 mittleren bzw. großen Zweistromtriebwerken ausgerüstet sind. Sie werden für den internationalen und transkontinentalen Verkehr eingesetzt. Ihre Kapazität liegt zwischen 150 und 500 Passagieren. Zu den Langstreckenflugzeugen zählen auch die seit 1976 in geringer Anzahl im Liniendienst stehenden *Überschallpassagierflugzeuge*. Sie fliegen mit einer Reisegeschwindigkeit von ≈ 2200 km/h und ermöglichen dadurch z. B. bei einem Transatlantikflug von Paris nach New York eine Verringerung der Flugzeit auf ≈ 3,5 Stunden. Bisher sind jedoch lediglich die sowjetische TU 144 (Tafel 67) und die britisch-französische Gemeinschaftsentwicklung „Concorde" in Dienst gestellt worden. Diese Flugzeuge haben einen um mehr als dreimal so hohen Brennstoffverbrauch je Kilometer und Sitzplatz im Vergleich zu modernen Unterschallflugzeugen. Eine Vielzahl technischer, organisatorischer und ökonomischer Probleme beim rationellen Einsatz dieser Flugzeuge sind noch nicht endgültig geklärt.

Verbindungs- und Geschäftsflugzeuge sind Flugzeuge mit einer Abflugmasse von 5 bis 10 t und mittlerer Reichweite. Einzelne Typen ermöglichen bereits eine Reichweite von über 5000 km. Sie sind mit 2 PTL- oder Strahltriebwerken, selten noch mit Kolbentriebwerken ausgerüstet. Sie können in der Regel bis zu 10 Passagiere befördern. Ihre Instrumentierung und Kabinenausrüstung entspricht der moderner Mittelstreckenverkehrsflugzeuge. Sofern sie mit Strahltriebwerken, vorwiegend ZTL (vgl. 16.4.2.), ausgerüstet sind, werden Reiseflughöhen von 9 bis 11 km benutzt und Reisegeschwindigkeiten von 600 bis 800 km/h erreicht. PTL-Flugzeuge dieser Kategorie fliegen mit 300 bis 500 km/h in 3 bis 8 km Höhe. Sie werden als Dienstflugzeuge leitender Mitarbeiter in Staat, Industrie und Armee sowie als Sanitäts- und Schulflugzeuge verwendet. Ihre Besatzung besteht in der Regel aus 2 Mann.

Reise-, Sport- und Arbeitsflugzeuge haben eine Abflugmasse von ≈ 1 bis 5 t, sind mit 1 oder 2 Triebwerken, vorwiegend Kolbentriebwerken, ausgerüstet und können bis zu 6 Passagiere befördern bzw. als Arbeitsflugzeug eine Nutzmasse bis zu 1,5 t aufnehmen. Sie werden zur Anfängerausbildung, im Agrarflug (Tafel 67), Flugsport und Sanitätsflugwesen verwendet. Die Arbeits- bzw. Reiseflughöhe dieser Flugzeuge liegt zwischen 5 m und 3 km, ihre Geschwindigkeit zwischen 100 und 300 km/h. Die für Wettkampfzwecke, z. B. höheren Kunstflug, konstruierten Sportflugzeuge sind einsitzig. Sie zeichnen sich durch ein besonders niedriges Masse-Leistung-Verhältnis (3,4 bis 4,5 kg/kW), ein großes zulässiges Lastvielfaches als Maß für die Festigkeit der Konstruktion (± 10) und große Wendigkeit aus. Reise- und Sportflugzeuge sollen vor allem geringe Ansprüche bezüglich Be-

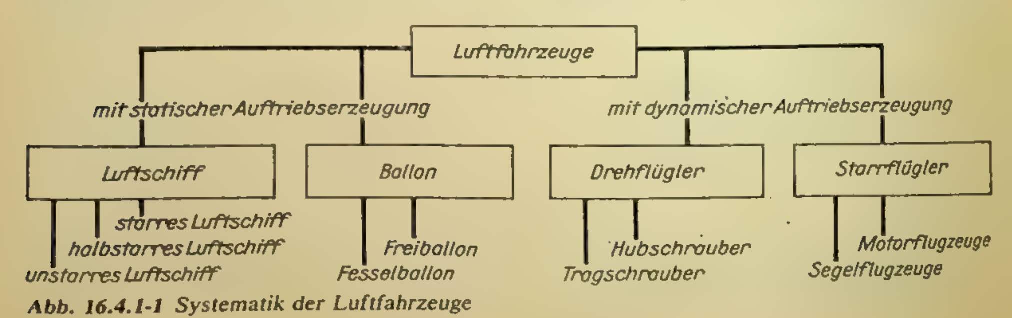


Abb. 16.4.1-1 Systematik der Luftfahrzeuge

dienung und Wartung haben. Bei Agrarflugzeugen wird großer Wert auf eine kurze Start- und Landestrecke bei hoher Nutzlast gelegt. Sie sollen besonders robust und korrosionsunempfindlich sein.

Segelflugzeuge und Motorsegler. Segelflugzeuge sind vorwiegend in Holz- oder Kunststoffbauweise ausgeführte, motorlose, ein- oder zweisitzige Flugzeuge. Ihre Flugmasse liegt zwischen 300 und 600 kg. Das Verhältnis von Flugmasse und Tragflügelfläche liegt zwischen 20 und 40 kg/m^2, die Tragflügelstreckung, das Quadrat der Spannweite bezogen auf die Tragflügelfläche, liegt zwischen 20 und 30 und ist damit um ein vielfaches größer als bei allen anderen Flugzeugkategorien. Segelflugzeuge erhalten ihre Antriebskraft durch die in Bahnrichtung weisende Komponente der Gewichtskraft. Daraus ergibt sich, daß Segelflugzeuge immer relativ zu der sie umgebenden Luft abwärts gleiten. Wenn die Luft in Aufwindgebieten schneller steigt als das Segelflugzeug sinkt, kann es absolut an Höhe gewinnen. Aus diesem Grunde soll die aerodynamische Qualität, das Verhältnis von Auftrieb und Widerstand, möglichst groß und die Sinkgeschwindigkeit möglichst klein sein. Hochleistungssegelflugzeuge erreichen eine aerodynamische Qualität von mehr als 45 und eine Sinkgeschwindigkeit von weniger als 0,50 m/s. Mit solchen Flugzeugen sind bereits über 1 600 km im freien Streckenflug bewältigt worden. Die mit Segelflugzeugen bisher größte erreichte Höhe liegt über 14 km. Der Start der Segelflugzeuge geschieht mit Hilfe einer Motorwinde oder eines Schleppflugzeugs. Um Segelflugzeuge von derartigen Starthilfen unabhängig zu machen, ist in jüngster Zeit die Kategorie der *Motorsegler* entstanden. Das sind eigenstartfähige Flugzeuge mit hoher aerodynamischer Qualität und Tragflügelstreckung, die Start und Steigflug auf eine bestimmte Höhe mit Motorkraft durchführen und danach mit abgeschaltetem Triebwerk als Segelflugzeug geflogen werden.

Jagdflugzeuge sind ein- oder zweimotorige und ein- oder zweisitzige Strahlflugzeuge mit einer Abflugmasse von 5 bis 30 t (Tafel 66). Sie werden sowohl als Jagdflugzeuge als auch als Jagdbomber eingesetzt und zeichnen sich durch starke Bewaffnung, hohe Gefechtsbereitschaft, hohe Steigleistung (bis 250 m/s in Bodennähe) und eine Maximalgeschwindigkeit (bis zu einer Machzahl M = 3) sowie eine Dienstgipfelhöhe bis zu 30 km aus. Das Verhältnis von Startmasse zu Tragflügelfläche erreicht häufig Werte von über 500 kg/m^2, das von Schub zu Startmasse häufig nahezu 10 N/kg. Die Bewaffnung besteht aus mehreren Maschinenkanonen mit einem Kaliber bis zu 37 mm sowie aus Raketen und Bomben. Eine umfangreiche komplizierte elektronische Ausrüstung für die Feuerleitung, Navigation, Flugzeugführung und Freund-Feind-Erkennung sowie eine leistungsfähige Antriebsanlage u. a. Ausrüstungen erfordern eine umfangreiche Bodenorganisation. Um den Geschwindigkeitsbereich zu erweitern, werden Jagdflugzeuge mit veränderlicher Tragflügelgeometrie (Schwenkflügler, vgl. 16.4.3.) oder mit Kurz- bzw. Senkrechtstarteigenschaften entwickelt. Bei diesen Flugzeugen werden besonders hohe Anforderungen an die Steuer- und Regeleinrichtungen für die Tragflügel bzw. für die Antriebsanlage gestellt.

Bombenflugzeuge sind mittlere bis große zwei-, vier- oder achtmotorige Flugzeuge zum Transport von Raketen und Abwurfwaffen. Es werden vorwiegend Strahltriebwerke, in Einzelfällen noch PTL-Triebwerke, benutzt. Der Geschwindigkeitsbereich reicht von hoher Unterschallgeschwindigkeit bis zu zweifacher Schallgeschwindigkeit. Die maximale Abflugmasse beträgt 20 bis 60 t bei taktischen und 70 bis 250 t bei strategischen Bombenflugzeugen. Die Flächenbelastung erreicht in Einzelfällen nahezu 600 kg/m^2. Die Besatzung besteht aus 2 bis 3 Mann bei taktischen Bombenflugzeugen und Jagdbombern und aus 2 bis 8 Mann bei strategischen Bombern. Die Waffenzuladung strategischer Bomber beträgt bis zu 35 t, ihre Reichweite ohne Luftbetankung bis zu 16000 km. Die praktische Gipfelhöhe liegt bei einzelnen Typen bereits bei 20 km. Bombenflugzeuge haben eine umfangreiche elektronische Ausrüstung, z. B. Funkmeßanlagen zur Zielsuche und Ortung angreifender Jagdflugzeuge, radargesteuerte Abwehrbewaffnung, Anlagen zur Störung der gegnerischen Funkmeßaufklärung und zur Lenkung der eigenen Raketenbewaffnung. Weiterhin sind automatische Flugregler und in vielen Fällen Trägheitsnavigationsanlagen vorhanden. Alle modernen Bombenflugzeuge sind als Kernwaffenträger geeignet.

Hubschrauber gehören zur Kategorie der Drehflügler (Abb. 16.4.1-2). Der notwendige Auftrieb wird durch eine Tragschraube erzeugt. Für die Auftriebserzeugung ist bei einem Drehflügler eine wesentlich höhere Antriebsleistung erforderlich als bei einem Starrflügler. Aus diesem Grunde ist die mit Hubschraubern erreichbare Geschwindigkeit, Reichweite und Nutzlast geringer als bei konventionellen Flugzeugen mit vergleichbarer Antriebsleistung. Dennoch hat sich der Hubschrauber aufgrund seiner guten Manövrierbarkeit im zivilen und besonders im militärischen Bereich breite Anwendungsgebiete erobert. Er wird eingesetzt im Agrar- und Sanitätsflug, für den kartografischen Dienst, für Montage- (Tafel 66) und Transportzwecke sowie für den Zubringerverkehr zu großen Flughäfen. Im militärischen Bereich dient der Hubschrauber zur Lösung von Transport- und Aufklärungsaufgaben und in jüngster Zeit auch direkt zur Lösung von Gefechtsaufgaben, z. B. der Panzerabwehr. Hubschrauber sind je nach Größe mit 1 oder 2 Gasturbinen (in Einzelfällen bis 4)

ausgerüstet, kleinere Maschinen haben Kolbentriebwerke. Sie haben weiterhin eine vollständige Instrumentenflugausrüstung und entsprechend ihrer Aufgabe eine umfangreiche Spezialausrüstung, z. B. Bordwinden, Lastaufhängevorrichtungen, Starteinrichtungen für Raketen usw. Die Reisegeschwindigkeit mittlerer Hubschrauber liegt bei 200 km/h, ihre Reichweite ist in der Regel kleiner als 500 km. Der z. Z. größte Hubschrauber der Welt, die MI 12 (UdSSR), erreicht eine Abflugmasse von 105 t und eine maximale Zuladung von 40 t.

Ballone und Luftschiffe sind Luftfahrzeuge mit statischem Auftrieb. Sie schweben in der Höhe, in der die Masse der von ihnen verdrängten Luft gleich ihrer Eigenmasse ist. Verringert sich die Eigenmasse, so überwiegt vorübergehend der Auftrieb, und die Höhe vergrößert sich so lange, bis aufgrund der geringeren Luftdichte wieder Gleichgewicht zwischen Gewichtskraft und Auftrieb herrscht. Zur Erzeugung des notwendigen Auftriebs ist ein großer, mit Traggas (leichter als Luft) gefüllter Verdrängungskörper notwendig. Mit 1 m^3 Wasserstoff kann in Bodennähe eine Auftriebskraft von $\approx$ 11 N und mit 1 m^3 Helium eine von 10 N erzeugt werden.

Ballone sind ungelenkte Luftfahrzeuge ohne Antrieb. Gegenwärtig dienen sie als Sportgeräte und zu wissenschaftlichen Zwecken.

Luftschiffe sind lenkbare Luftfahrzeuge mit Antrieb. Zwischen den beiden Weltkriegen wurden Luftschiffe zur Personenbeförderung, vor allem im transatlantischen Verkehr, mit Reisegeschwindigkeiten bis 130 km/h eingesetzt. Eines der fortgeschrittensten Fahrzeuge dieser Kategorie war das 1936 in Dienst gestellte LZ 129 mit einer Länge von 245 m, einem Traggasvolumen von 200 000 m^3 und einer Antriebsleistung von 3 090 kW, die von 4 Dieselmotoren erzeugt wurde. Die Reichweite betrug bis zu 16 000 km bei einer Fahrtdauer von 140 Stunden. Vorbereitung und Ausbruch des zweiten Weltkrieges verhinderten leider die weitere Entwicklung dieser Fahrzeuge.

Gegenwärtig werden Untersuchungen durchgeführt, dem Luftschiff als Funk- und Fernsehrelaisstation, als Träger von Reklameleuchtschriften und als Langstrecken-Schwerlasttransportmittel neue Einsatzgebiete zu erschließen. Eine wichtige Voraussetzung ist die preisgünstige Produktion großer Mengen Helium als Traggas, die Entwicklung ökonomischer Verfahren der Auftriebsregelung und die ökonomische Unterbringung bzw. Verankerung der Fahrzeuge.

16.4.2. Luftfahrzeugantriebe

Wirkungsprinzip und Systematik. Im Gegensatz zu Straßen- und Schienenfahrzeugen, deren Antrieb durch eine kraftschlüssige Verbindung der Antriebsräder mit ihrer Unterlage zustande kommt, beruht das Wirkungsprinzip der Luftfahrzeugantriebe auf dem Impulssatz. Von der Antriebsanlage wird eine bestimmte Luftmasse erfaßt und entgegen der beabsichtigten Bewegungsrichtung beschleunigt. Die dabei entstehende Schubkraft F_s zur Beschleunigung des Luftfahrzeugs, zur Überwindung der Widerstände, insbesondere des Luftwiderstands, oder zum Heben und Tragen des Luftfahrzeugs (bei Hubschraubern und Senkrechtsstartern) ergibt sich aus $F_s = \dot{m}(c - v)$ ($\dot{m}$ = Massestrom von Luft und Brennstoff, c = Strahlgeschwindigkeit, v = Fluggeschwindigkeit des Luftfahrzeugs).

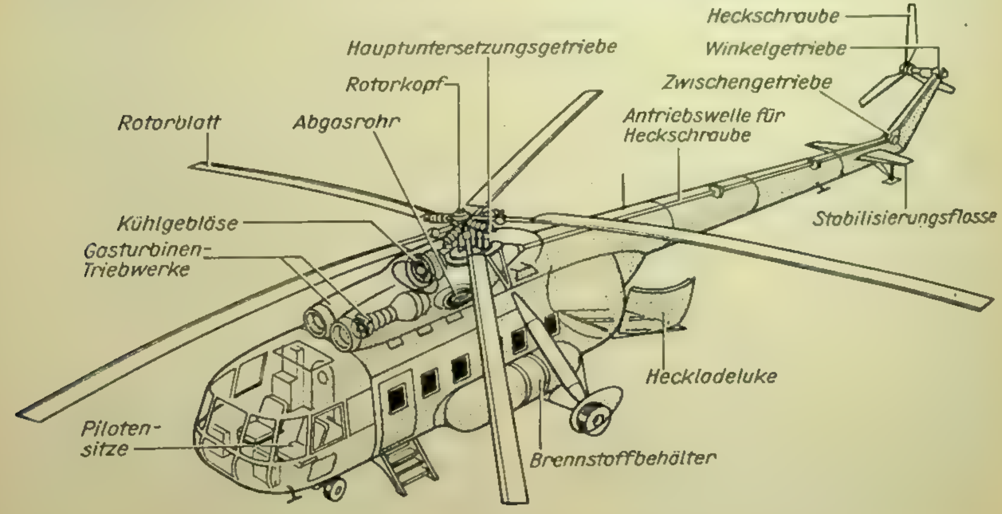


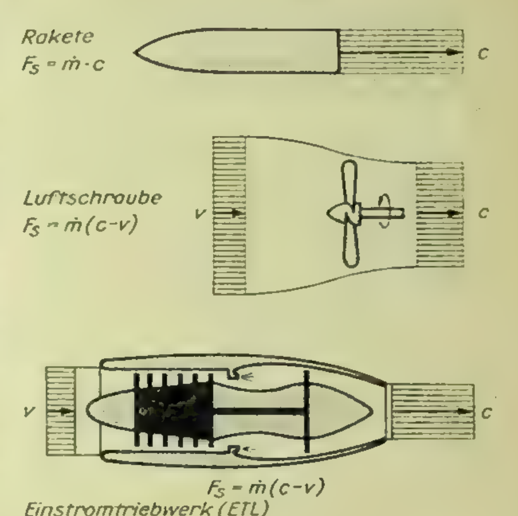
Abb. 16.4.1-2 Passagierhubschrauber Mi-8 (UdSSR)

Die Beschleunigung der Luft- oder Gasmasse kann erfolgen durch: 1. Luft- bzw. Tragschraube, 2. Luftschraube und Gasturbinentriebwerk, 3. Gasturbinentriebwerk, 4. Staustrahl- oder Pulsotriebwerk, 5. Raketentriebwerk (Abb. 16.4.2-1).

Einschließlich der Antriebe von Flugmodellen existieren gegenwärtig Luftfahrzeugantriebe in dem Leistungsbereich von 0,1 bis 10^5 kW. Sie arbeiten in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 3 000 km/h und in einem Höhenbereich von 0 bis 30 km, jeweils ohne Berücksichtigung von Raketen. Als Triebwerke für Luftfahrzeugantriebsanlagen kommen ausschließlich Wärmekraftmaschinen in Frage. Sie sollen bei größter Zuverlässigkeit einen hohen Wirkungsgrad und ein hohes Leistungs-Masse-Verhältnis haben. Dabei spielt die Zuverlässigkeit der Flugzeugtriebwerke eine besondere Rolle, da in keinem anderen Zweig des Verkehrswesens die Sicherheit in so starkem Maße von der Zuverlässigkeit der Antriebsanlage abhängt wie in der Luftfahrt.

Verdichterlose Strahl- und Raketentriebwerke werden in der Luftfahrt nur in Sonderfällen eingesetzt.

Luftschrauben gehören zu den Strömungsarbeitsmaschinen. Die Luftschraube wandelt das Drehmoment eines Kolben- oder Gasturbinentriebwerks in eine Schubkraft um. Es werden Zwei-, Drei- und Vierblattluftschrauben in Holz- oder Metallbauweise verwendet. Für Triebwerke bis zu einer Startleistung von ≈ 100 kW werden häufig starre, direktangetriebene Zweiblattluftschrauben in Holz- oder Kunststoffbauweise angewendet. Bei größeren Leistungen kommen automatische Zwei- oder Dreiblattluftschrauben mit vorwählbarer, konstanter Drehzahl zum Einsatz. Für Triebwerke ab ≈ 10^3 kW werden vorwiegend Vierblattluftschrauben in Metallbauweise verwendet. Diese Luftschrauben haben eine Vielzahl von Sondereinrichtungen, die zur Erhöhung der Sicherheit und zur Verbesserung des Betriebsverhaltens dienen, wie z. B. Drehzahlregeleinrichtung, Enteisungs-, Segelstellungsanlage, Arretierungseinrichtungen für die Blätter. Bei Verstelluftschrauben können die Blätter während des Fluges um die Längsachse verdreht werden. Dadurch ist ein Anpassen an die Flugbedingungen möglich und der Wirkungsgrad wird verbessert. Die Verstelluftschraube ermöglicht einen höheren Startschub und dadurch geringere Startstrecke, größere Schubreserve und dadurch größere Steiggeschwindigkeit sowie größere Höchstgeschwindigkeit. Wichtige Kennwerte einer Luftschraube sind Schub und Wirkungsgrad sowie die Abhängigkeit dieser Größen von der Fluggeschwindigkeit für eine bestimmte Drehzahl und Leistung. Der Schub ist bei Standbetrieb am größten, mit wachsender Fluggeschwindigkeit wird er geringer. Der spezifische Standschub moderner Luftschrauben liegt zwischen 30 N/kW Triebwerks-



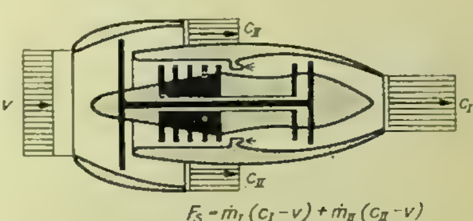


Abb. 16.4.2-1 Grundarten der Schuberzeugung

leistung bei Luftschrauben für Fluggeschwindigkeiten bis ≈ 200 km/h und 15 N/kW bei Luftschrauben für Fluggeschwindigkeiten zwischen 500 und 700 km/h.

Der Wirkungsgrad einer Luftschraube ist das Verhältnis von abgegebener Leistung (Schub × Fluggeschwindigkeit) zu aufgenommener Triebwerksleistung. Er ist beim Standlauf = 0 und erreicht im Bestpunkt ≈ 80 %. Bei Auslegungsgeschwindigkeiten über 700 km/h sinkt der erreichbare Bestwert mit zunehmender Geschwindigkeit ab.

Kolbentriebwerke gibt es bis zu einer Leistung von ≈ 2 500 kW. Es sind große 18- oder 28-Zylinder-Triebwerke mit einem Hubvolumen bis zu 71,6 dm^3. Ihre Masse (ohne Luftschraube) beträgt bis zu 1,7 t. Bei Flugzeugneuentwicklungen werden jetzt jedoch für Leistungen über 500 kW ausschließlich Gasturbinentriebwerke verwendet. Die gegenwärtig wichtige Kategorie der Kolbentriebwerke bis ≈ 500 kW wird verwendet für Sport-, Reise-, Übungs-, Sanitäts-, Geschäfts-, Arbeitsflugzeuge, Kleinhubschrauber, Spezialflugzeuge des Motorkunstflugs und Mo-

torsegler. Es werden ausschließlich luftgekühlte Viertakt-Ottomotoren (vgl. 2.6.2.) verwendet. Triebwerke für Motorsegler mit Leistungen von 20 bis 60 kW sind häufig von luftgekühlten PKW-Motoren abgeleitet. Das Zylindervolumen der Kolbentriebwerke zwischen 80 und 500 kW liegt zwischen 1 und 2 dm^3 bei Zylinderzahlen von 4 bis 9. Für die Zylinderanordnung werden *Reihen-* (4 und 6 Zylinder), *Boxer-* (4, 6 und 8 Zylinder) und *Sternanordnung* (5, 7 und 9 Zylinder) bevorzugt. Es werden sowohl aufgeladene (mechanische Aufladung) als auch nicht aufgeladene Triebwerke eingesetzt. Einfache Triebwerke sind mit Vergaser ausgerüstet, aufwendigere mit Brennstoffeinspritzung. Es gibt Triebwerke mit direkt von der Kurbelwelle angetriebener Luftschraube und auch solche, bei denen der Antrieb der Luftschraube über ein Zwischengetriebe erfolgt. Die Startdrehzahlen liegen zwischen 2 200 und 3 200 U/min, die Verdichtungsverhältnisse zwischen 6 und 8. Bei aufgeladenen Triebwerken (Triebwerke mit Vorverdichtung) werden bei Startleistung Ladedrücke von 107 bis 133 kPa (800 bis 1 000 Torr) angewendet. Das Leistungs-Masse-Verhältnis liegt bei 1 kW/kg und das Leistungs-Hubvolumen-Verhältnis zwischen 20 und 35 kW/dm^3. Häufig existieren von einem Grundmuster eines Triebwerks eine Vielzahl von Varianten, die sich durch unterschiedliche Leistung und Ausrüstung unterscheiden, z. B. zusätzliches Kühlgebläse und Getriebe für den Hubschrauberantrieb, Luftschraubengetriebe, Brennstoffeinspritzung und Drehzahlregler usw. Weiterhin haben sie unterschiedliche Verdichtungsverhältnisse, Steuerzeiten, Zündeinstellungen und Drehzahlen. Zum Anlassen werden elektrische oder Preßluftanlasser benutzt. Für die Erzeugung der Zündspannung kommen ausschließlich 2 unabhängig voneinander arbeitende Zündmagnete in Frage. Der Anlaßvorgang wird durch eine Batteriezündung (Anlaßsummerzündung) unterstützt. Flugmotoren zeichnen sich im allgemeinen durch besondere Sorgfalt in Konstruktion und Fertigung aus. Im Resultat dessen ist die Betriebszuverlässigkeit der Kolbenflugmotoren trotz hoher mittlerer Belastung deutlich größer als bei Fahrzeugmotoren der gleichen Leistungsklasse. Das Betriebsverhalten eines Kolbentriebwerks wird im wesentlichen durch Drosselhebelstellung, Drehzahl und Flughöhe bestimmt.

Gasturbinentriebwerke arbeiten nach dem Joule-Prozeß. Sie bestehen aus einem „Gaserzeuger" und einem „Schubwandler". Der *Gaserzeuger*, bestehend aus Verdichter, Brennkammer und Turbine zum Antrieb des Verdichters, erzeugt ein Arbeitsgas von hoher Temperatur (vgl. 2.6.3.). Bei Strahltriebwerken wird dieses Arbeitsgas in der als *Schubwandler* arbeitenden Schubdüse entspannt und auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt. Bei Gasturbinentriebwerken, die eine Wellenleistung abgeben, z. B. Hubschrauberturbinen, wird das Arbeitsgas nicht in einer Schubdüse, sondern in weiteren Turbinenstufen entspannt. Die von diesen Turbinenstufen (Nutzleistungsturbine) erzeugte Wellenleistung wird über mehrstufige Getriebe zur Tragschraube geleitet. Bei den Propellerturbinen-Luftstrahltriebwerken (PTL) und auch den Zweistromturbinen-Luftstrahltriebwerken (ZTL) wird das Arbeitsgas in der Nutzleistungsturbine nur teilweise entspannt (bei PTL ≈ 90%, bei ZTL 40 bis 80%). Die erzeugte Wellenleistung wird bei PTL zum Antrieb der Luftschraube und bei ZTL zum Antrieb des Bläsers verwendet. Die restliche Entspannung findet sowohl bei PTL als auch bei ZTL in der Schubdüse statt. Gasturbinentriebwerke zeichnen sich im Vergleich mit Kolbentriebwerken durch ein deutlich höheres Leistungs-Masse-Verhältnis und Leistungs-Raum-Verhältnis aus. Sie haben in der Regel eine

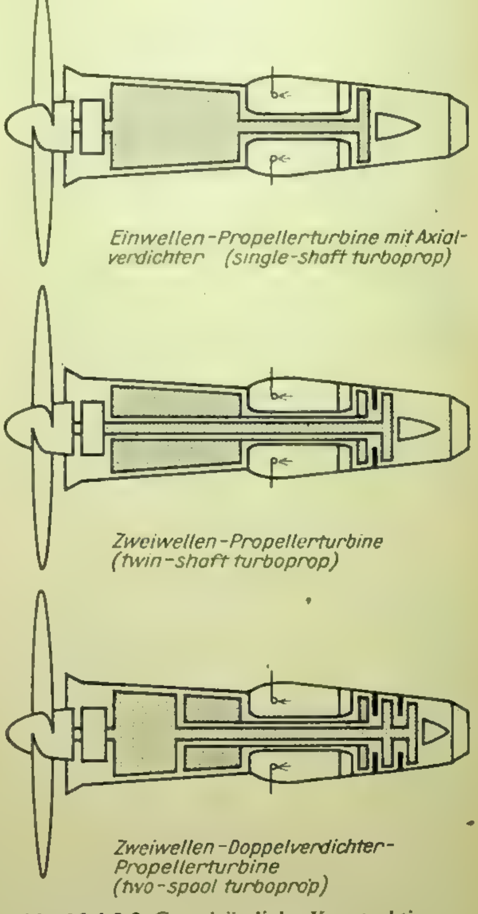
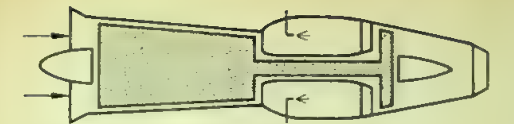
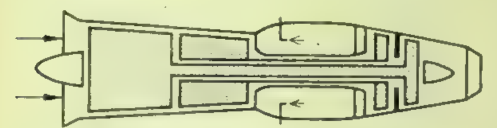


Abb. 16.4.2-2 Grundsätzliche Konstruktionsschemen von PTL



Einwellen-Strahlturbine mit Axialverdichter (straight-jet)



Zweiwellen- oder Doppelverdichter-Strahlturbine (two-spool jet)

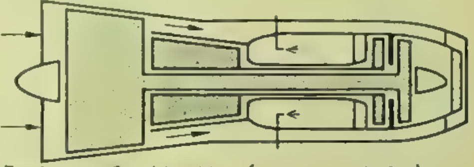
***Abb. 16.4.2-3** Grundsätzliche Konstruktionsschemen von ETL*

höhere Zuverlässigkeit und Lebensdauer und verarbeiten weniger feuergefährliche Brennstoffe. Die Betriebsbereitschaft ist höher als bei Kolbentriebwerken. Die erreichbaren Höchstleistungen sind gegenwärtig ≈ 25mal so groß wie bei Kolbentriebwerken.

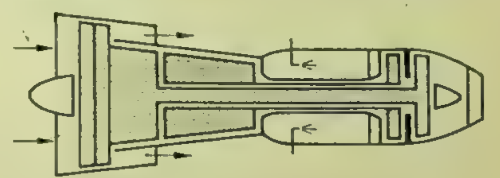
Propellerturbinen-Luftstrahltriebwerke (PTL) gibt es in einem Leistungsbereich von 100 bis 10 000 kW. Er liegt gegenwärtig jedoch bei PTL zwischen 300 und 3 000 kW, bei Hubschrauberturbinen zwischen 200 und 5 000 kW. Mit Ausnahme einiger älterer Konstruktionen werden nahezu ausschließlich Zweiwellentriebwerke angewendet (Abb. 16.4.2-2). Die größte Verbreitung finden PTL in der Leistungsklasse um 500 kW zum Antrieb von zweimotorigen Verbindungs-, Geschäfts- und Reiseflugzeugen. Sie erlauben bei einer Flugmasse von 4 bis 6 t und 8 bis 15 Passagieren Reisegeschwindigkeiten zwischen 350 und 450 km/h. Ein modernes Triebwerk dieser Kategorie ist das französische Triebwerk „Astazou XIV" mit 590 kW bei einer Drehzahl von 43 000 U/min, einem Luftdurchsatz von 2,5 kg/s und einer Eigenmasse von nur 206 kg.

Einstromturbinen-Luftstrahltriebwerke (ETL) werden für den Antrieb von Jagdbombern (30 bis 60 kN) und militärischen und zivilen Überschallflugzeugen (bis 230 kN), häufig in Verbindung mit Nachbrenner eingesetzt. Sie sind die konstruktiv einfachste und leichteste Kategorie der Gasturbinentriebwerke (Abb. 16.4.2-3). Allerdings ist ihre Wirtschaftlichkeit bei Unterschallfluggeschwindigkeiten nur gering im Vergleich mit anderen Gasturbinentriebwerken. Bei Fluggeschwindigkeiten über zweifacher Schallgeschwindigkeit erreichen sie jedoch sehr hohe Wirkungsgrade. Ein modernes Triebwerk dieser Kategorie zum Antrieb von Überschallverkehrsflugzeugen ist das „Olympus 593" des Flugzeugs Concorde mit einem Schub von ≈ 170 kN bei einem Luftdurchsatz von 204 kg/s und einer Eigenmasse von 3 202 kg. Die innere Leistung dieses Triebwerks bei Startbetrieb liegt in der Größenordnung von 80 MW.

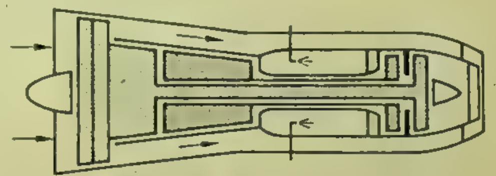
Zweistromturbinen-Luftstrahltriebwerke (ZTL) sind gegenwärtig die wichtigste Kategorie der Flugzeugantriebe (Abb. 16.4.2-4). Sie werden in der Zivil- und Militärluftfahrt in dem Geschwindigkeitsbereich von 600 bis 950 km/h, in Einzelfällen auch für Überschallgeschwindigkeiten, eingesetzt. ZTL zeichnen sich vor allem durch hohe Wirtschaftlichkeit aus. Sie ermöglichen bei Geschäftsflugzeugen bereits transatlantische Reichweiten und bei großen Transportflugzeugen Nutzmassen von mehr als 100 t bei Reichweiten von 6 000 km und Reisemachzahlen von 0,8. ZTL existieren gegenwärtig in einem Schubbereich von 2 bis 260 kN. Ein bewährtes Triebwerk der großen Klasse ist das CF 6-50 C mit 222 kN Startschub bei einer Eigenmasse von 3 731 kg und einem Brennstoffverbrauch bei Startstandbetrieb von 8 900 kg/h. Dabei beträgt die innere Leistung ≈ 40 MW.



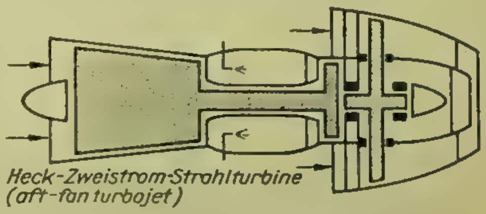
Zweistrom-Strahlturbine (bypass-turbojet)



Front-Zweistrom-Strahlturbine mit offenem Mantel (front-fan jet)



Front-Zweistrom-Strahlturbine mit geschlossesenem Mantel (tucted front-fan jet)



Heck-Zweistrom-Strahlturbine (aft-fan turbojet)

***Abb. 16.4.2-4** Grundsätzliche Konstruktionsschemen von ZTL*

16.4.3. Flugzeugbaugruppen

Tragwerk. Das Tragwerk, auch *Tragflügel* genannt, dient bei Starr- und Schwenkflüglern zur Erzeugung der notwendigen Auftriebskraft. Diese Kraft ist im Geradeausflug gleich der Gewichtskraft des Flugzeugs. Bei Flugmanövern kann sie sowohl größer als auch kleiner sein. Die Auftriebskraft $F_A = {}^1/_2 c_a \cdot \varrho \cdot v^2 \cdot A$ steht stets senkrecht auf der Anströmrichtung. Die zweite Komponente der am Tragflügel angreifenden Luftkraft ist der Widerstand $F_W = {}^1/_2 c_w \cdot \varrho \cdot v^2 \cdot A$; er wirkt stets in Anströmrichtung (Abb. 16.4.3-1). Das Tragwerk soll bei geringster Eigenmasse und bei geringstem Widerstand einen möglichst großen Auftrieb erzeugen.

Bei konstanter Luftdichte ϱ, Geschwindigkeit v und Tragflügelfläche A sind Auftrieb und Widerstand bzw. die Beiwerte c_a und c_w vom Anstellwinkel α abhängig. Diese Abhängigkeit wird experimentell ermittelt. *Tragflügelformen* und *-anordnungen* sind nach dem Verwendungszweck und der Geschwindigkeit des Flugzeugs unterschiedlich (Abb. 16.4.3-2). Während für Sport- und Reiseflugzeuge für geringe Geschwindigkeiten der *Rechteck-* oder *Trapezflügel* angewendet wird, bevorzugt man für hohe Unterschallgeschwindigkeiten und für Überschallgeschwindigkeiten den *Pfeil-* oder *Dreieckflügel.* Für Transportflugzeuge, insbesondere im militärischen Bereich, wird die *Schulteranordnung* und für Verkehrs-, Sport- und Reiseflugzeuge vorwiegend die *Mittel-* oder *Tiefanordnung* der Tragflügel gewählt. In neuerer Zeit gelangen in der Kategorie der Jagdbomber verstärkt sog. *Schwenkflügler,* z. B. MIG-23, zum Einsatz. Das sind Flugzeuge mit veränderlicher Tragflügelgeometrie bezüglich

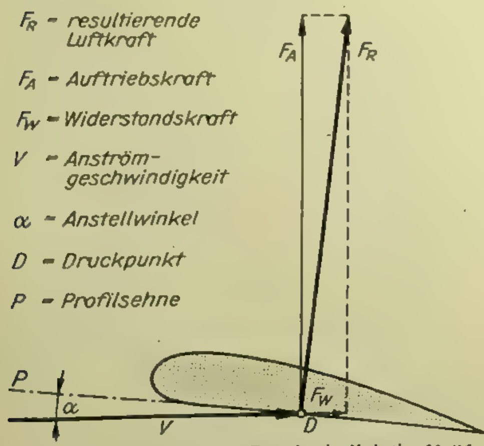


Abb. 16.4.3-1 Winkel, Geschwindigkeit, Kräfte und Bezeichnung am Tragflügelprofil

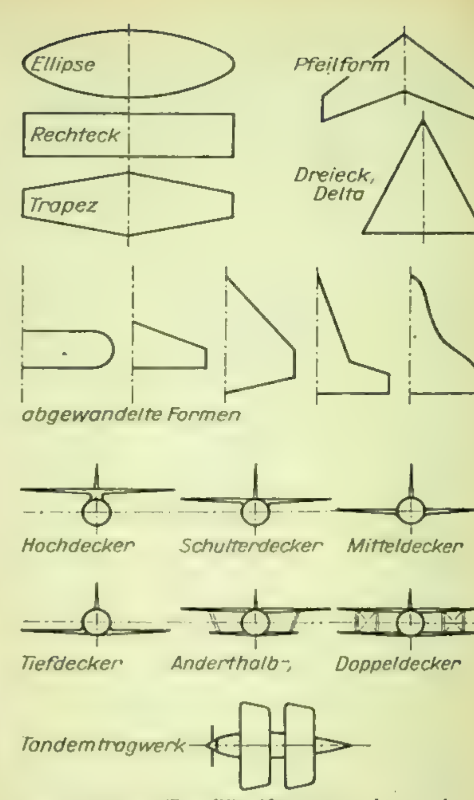


Abb. 16.4.3-2 Tragflügelformen und -anordnungen

des Pfeilwinkels und der Spannweite (Tragflügelstreckung). Dadurch können die Start- und Landeeigenschaften, die Manövrierbarkeit bei geringen Geschwindigkeiten und der Flugzeugwiderstand im Machzahlbereich zwischen 1 und 2 günstig beeinflußt werden. Es sind Pfeilwinkeländerungen zwischen 15° und 70° üblich. Durch die kompliziertere Konstruktion wird das Flugzeug allerdings schwerer. Es sind zusätzliche Steuer- und Regelungsanlagen sowie Sicherheitseinrichtungen erforderlich.

Die Tragflügel dienen vielfach zur Aufnahme der Brennstofftanks. Trieb- und Fahrwerke werden ebenfalls häufig an den Tragflügeln angebracht. Durch diese Maßnahmen braucht z. B. die zum Tragen dieser Massen notwendige Auftriebskraft nicht über den ohnehin hochbelasteten Tragflügelanschluß am Rumpf geleitet zu werden. Auch die zur Überwindung des Tragflügelwiderstands notwendige Triebwerksschubkraft belastet den Tragflügelanschluß nicht.

Start- und Landehilfen. Vorflügel und verschiedene Klappensysteme an der Tragflügelhinter- und Vorderkante dienen zur Erhöhung des Auftriebsbeiwerts, wobei jedoch eine unerwünschte Vergrößerung des Widerstandsbeiwerts auftritt. Durch diese Einrichtungen werden Abhebe-

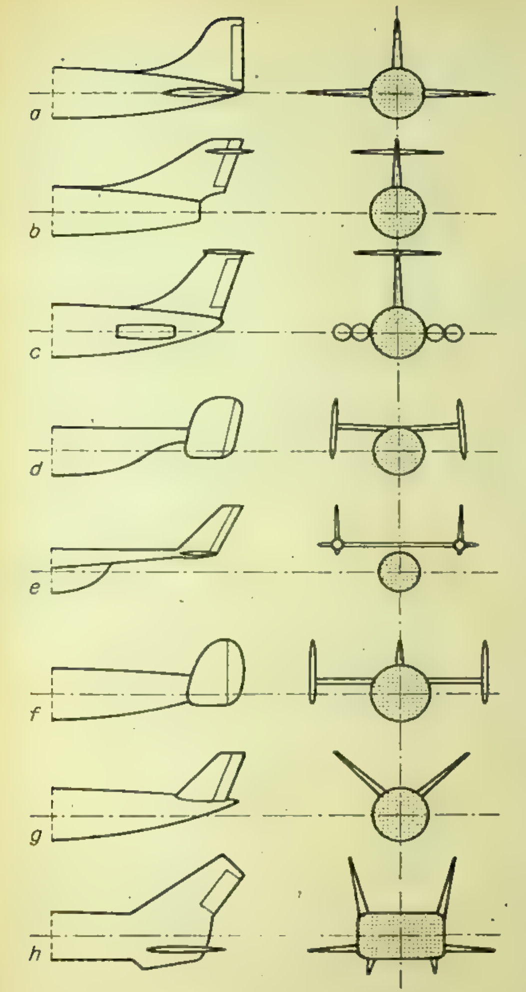


Abb. 16.4.3-3 Leitwerksformen, a einfaches Seitenleitwerk mit Höhenleitwerk am Rumpfheck (IL-18), b einfaches gepfeiltes Seitenleitwerk mit Höhenleitwerk in der Mitte des Seitenleitwerkes (MiG-15), c einfaches gepfeiltes Seitenleitwerk mit oben liegendem Höhenleitwerk (IL-62), d doppeltes Seitenleitwerk an den Enden der am Rumpf befestigten Höhenleitwerksflossen (An-22), e doppeltes Seitenleitwerk mit dazwischen liegendem Höhenleitwerk an 2 Rumpfbalken (Hawker-Siddeley AW-66), f dreifaches Seitenleitwerk mit einfachem Höhenleitwerk als Kombination von a und d (Super-Constellation), g V-Leitwerk, bei dem Höhen- und Seitenleitwerk zu einer Einheit verschmolzen sind (Antonow Segelflugzeug A-15), h doppeltes Seitenleitwerk, auf dem Rumpf aufgesetzt, mit am Rumpf tiefliegend befestigtem Höhenleitwerk und Hilfsflossen unter dem Rumpfheck (E-266)

sowie Anflug- und Landegeschwindigkeit verringert. Ein weiteres Klappensystem, die sog. *Störklappen (Spoiler, Interzeptoren)*, haben die Aufgabe, den Auftrieb zu verkleinern und den Widerstand zu vergrößern. Sie verhindern ein Aufschweben des Flugzeugs nach dem Aufsetzen und verkürzen die Ausrollstrecke.
Querruder befinden sich an der Tragflügelhinterkante im äußeren Bereich. Sie dienen zur Drehung des Flugzeugs um die Längsachse, z. B. beim Einleiten einer Kurve.
Die Tragflügelprofile sind entsprechend dem Anwendungszweck des Flugzeugs, insbesondere entsprechend dem Geschwindigkeitsbereich, stark unterschiedlich. Für höhere Fluggeschwindigkeiten werden Profile mit geringer relativer Dicke verwendet. Die Masse des Tragwerks beträgt bei modernen Unterschallverkehrsflugzeugen 10 bis 15 % der Flugmasse.
Rumpfwerk. Das Rumpfwerk, auch einfach *Rumpf* genannt, dient zur Aufnahme von Besatzung, Passagieren, Gepäck und Fracht. Weiterhin sind vielfältige Ausrüstungen, Systeme und Anlagen und häufig auch Brenn- und Schmierstoffe im Rumpf untergebracht. Der Rumpfquerschnitt ist rund oder oval, die Rumpfmasse liegt bei 9 bis 12 % der Flugmasse. Form und Bauweise des Rumpfes richten sich nach dem Verwendungszweck des Flugzeugs. In Verkehrsflugzeugen mit Reiseflughöhen über 3 km enthält der Rumpf eine *Druckkabine*, in der automatisch Druck und Temperatur geregelt werden. Neben den Beanspruchungen aus Stau- und Innendruck nimmt der Rumpf die Kräfte aus Trag-, Leit-, Trieb- und Fahrwerk auf. Die Stellen der Krafteinleitung und -umleitungen an Fenstern, Türen und Beladeöffnungen und die Tragflügelanschlüsse unterliegen deshalb besonders hohen Beanspruchungen.
Bei Überschallverkehrsflugzeugen wird der Rumpfbug beim Landeanflug abgesenkt, um die Sicht der Flugzeugführer zu verbessern.
Leitwerk. Das Leitwerk besteht in seiner klassischen Form als Heckleitwerk aus dem *Höhen-* und *Seitenleitwerk* und diese wiederum aus dem feststehenden Teil, der sog. Flosse, und dem beweglichen Teil, dem Ruder (Abb. 16.4.3-3). Das Leitwerk dient zur Aufrechterhaltung der Längs- und Richtungsstabilität sowie der Steuerung des Längsneigungs- und Kurswinkels. Es ermöglicht also die Drehung des Flugzeugs um die Quer- und Hochachse. Die Drehung des Flugzeugs um die Längsachse geschieht durch die an der Tragflügelhinterkante angebrachten *Querruder*. Bei Überschallflugzeugen, z. B. der TU-144, wird häufig auf ein besonderes Höhenleitwerk verzichtet und dessen Funktion von den Querrudern oder von besonderen, an der Tragflügelhinterkante angebrachten Rudern übernommen. Das Seitenleitwerk kann ein-, zwei-

oder in Einzelfällen sogar dreifach (Lockheed „Constellation"-Reihe) ausgeführt sein, das Höhenleitwerk in der Regel einfach. Ein hochgesetztes Höhenleitwerk (T-Leitwerk) verbessert die Wirkung des Seitenleitwerks, bedingt jedoch eine schwerere Ausführung desselben, da es die Kräfte des Höhenleitwerks auf den Rumpf übertragen muß. Die Masse des Leitwerks beträgt bei modernen Verkehrsflugzeugen ≈ 2 bis 3 % der Flugmasse.

Fahrwerk. Flugzeugfahrwerke (Abb. 16.4.3-4) sind zur Aufnahme des Landestoßes gefedert und bei Strahlflugzeugen für Rollgeschwindigkeiten bis zu 300 km/h ausgelegt. Bei modernen Flugzeugen hat sich das *Bugradfahrwerk* durchgesetzt. Das Bugrad ist beim Rollen mit der Seitensteuerung verbunden und ermöglicht eine gute Manövrierfähigkeit des Flugzeugs am Boden. Zur Entlastung der Rollbahnen werden schwere Flugzeuge mit mehreren Rädern pro Fahrwerksbein ausgerüstet und damit eine Einzelradbelastung von weniger als 450 kN erreicht. Die Fahrwerke von Flugzeugen mit Reisegeschwindigkeiten über 200 km/h werden mit Hilfe von hydraulischen oder pneumatischen Servomotoren eingefahren, um den Gesamtwiderstand zu verringern. Kufen- und Schwimmfahrwerke sind Sonderbauformen nur für Spezialflugzeuge. Die Masse des Fahrwerks bei Verkehrsflugzeugen beträgt ≈ 4 bis 6 % der Startmasse.

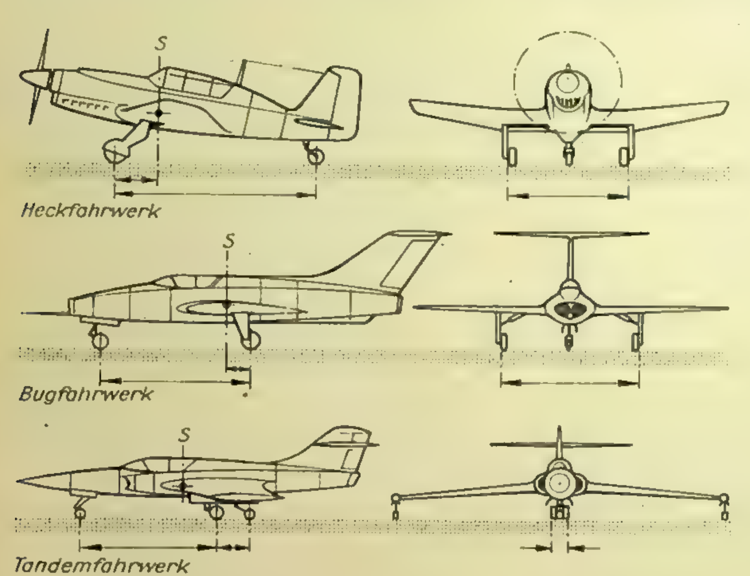


***Abb. 16.4.3-4** Fahrwerksanordnungen*

16.4.4. Flugzeugausrüstung

Ausrüstung ist in der Luftfahrt ein Sammelbegriff für Geräte und Anlagen sowie nicht zum Flug- oder Triebwerk gehörende Teile, die keine Geräte sind und auch nicht zu Anlagen gehören. Die Ausrüstung läßt sich entsprechend der benutzten Hilfsenergie in elektrische, pneumatische, hydraulische Ausrüstung einteilen.

Anlagen für die Anzeige der Fluglage und des Flugzustands. *Höhenmesser* dienen zur Anzeige der Flughöhe. Nach dem Bezugspunkt unterscheidet man absolute und relative Höhe sowie Höhe über Grund. *Absolute Höhe* ist die Höhe über Normal Null (Seehöhe), *relative Höhe* der senkrechte Abstand des Flugzeugs von einem Bezugspunkt, z. B. dem Start- oder Landeflugplatz. Die *Höhe über Grund* ist der Abstand über dem momentan überflogenen Gelände. Der *barometrische Höhenmesser* dient in Flugzeugen zur Flughöhenbestimmung (absolute und relative Höhe), indem der Luftdruck gemessen wird, der mit zunehmender Höhe kontinuierlich abnimmt. Der Luftdruck wirkt dabei auf 2 Druckdosen und verformt sie. Der so entstehende Dosenhub wird über ein Hebel- und Zahnradsystem auf 2 Zeiger übertragen, von denen der eine die Zehner und Hunderter, der andere die Tausender der Höhe in Metern anzeigt. Durch mechanische Verschiebung des Nullpunkts an einer Nebenskale sind diese Höhenmesser einstellbar: 1. auf Standard- oder Normaldruck (101 kPa bzw. 1013,25 mbar) zur Anzeige der Flughöhe in Meter STD (Standarddruck), 2. auf Bodenluft-

druck des Flugplatzes zur Anzeige der Flughöhe über Flugplatzhöhe oder 3. auf Anzeige der Höhe über NN. Beim Flug oberhalb einer festgelegten Höhe wird generell die Standardeinstellung von 1013,25 mbar als Bezugsdruck am Höhenmesser benutzt. Das *Statoskop* ist ein sehr genauer barometrischer Höhenmesser. Der Meßfehler in 5000 m Höhe liegt bei ± 60 cm.

Funk-Höhenmesser. Von einem Bordsender werden elektromagnetische Wellen ausgestrahlt und nach Reflexion an der Erdoberfläche von einem Bordempfänger wieder aufgenommen. Aus der Laufzeit der Wellen wird die Höhe berechnet und im Gegensatz zum barometrischen Verfahren die Höhenänderung der überflogenen Erdoberfläche (Höhe über Grund) berucksichtigt.

Fahrtmesser dienen zur Anzeige der Geschwindigkeit gegenüber der umgebenden Luft. Man verwendet fast ausschließlich Staudruck-Fahrtmesser (vgl. 13.2.3.).

Variometer (Abb. 16.4.4-1) zeigen die Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit eines Luftfahrzeugs an. In der Regel werden *Dosenvariometer* eingesetzt. Sie messen den Druckunterschied zwischen einem abgeschlossenen Raum und der Atmosphäre, wobei der abgeschlossene Raum über eine Kapillare mit der Atmosphäre verbunden ist. Wenn beim Sinken oder Steigen der statische Druck größer oder kleiner wird, verringert oder vergrößert sich das Volumen einer Membrandose oder eines Dosenpakets. Der Dosenhub wird mit einem Übertragungsmechanismus abgegriffen, in eine Drehbewegung umgewandelt und auf den Zeiger übertragen.

Elektrische Variometer sind Zusatzgeräte zum Funkhöhenmesser und ermitteln die Vertikalgeschwindigkeit aus der Differentiation der höhenabhängigen Spannung nach der Zeit.

Künstliche Horizonte sind Kreiselgeräte, die dem Piloten beim Instrumentenflug den nicht sichtbaren natürlichen Horizont ersetzen. Der künstliche Horizont enthält einen Kreisel mit vertikaler Achse und 3 Freiheitsgraden. Mit dem

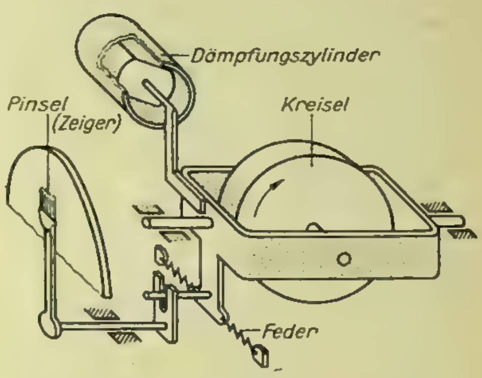


Abb. 16.4.4-2 Aufbau eines Wendezeigers

Kreisel bzw. den drehbaren Rahmen, in denen er aufgehängt ist, ist ein Flugzeugsymbol oder ein Horizontbalken verbunden, die gegenüber einer flugzeugfesten Skala oder einem flugzeugfesten Symbol Längs- und Querneigung angeben. Aus der relativen Lage von Flugzeugsymbol und Horizontbalken bzw. Neigungsskalen ergibt sich die Lage des Flugzeugs im Raum. Im *Wendehorizont* sind der künstliche Horizont und der Wendezeiger zu einem Gerät vereinigt.

Wendezeiger (Abb. 16.4.4-2) werden zur Anzeige der Drehgeschwindigkeit um die Hochachse benutzt. Das empfindliche Element im Wendezeiger ist ein *Wendekreisel*, dessen Präzessionsbewegung bei Drehung des Flugzeugs um die Hochachse angezeigt wird. Da in die Anzeige des Wendezeigers außer der Drehgeschwindigkeit auch die Querneigung des Flugzeugs eingeht, wurde auf eine Skale verzichtet. Die Winkelgeschwindigkeit kann durch Abschätzen des Ausschlags in Vielfachen der Zeigerbreite („Pinselbreite") angegeben werden, wenn Richtungsänderungen stets mit gleicher Querlage

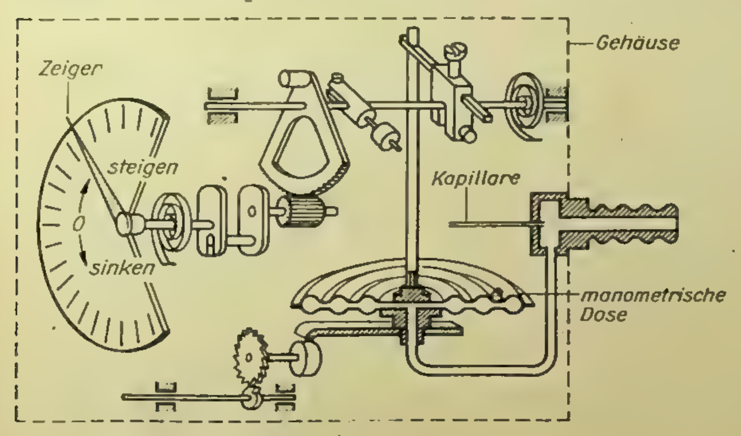


Abb. 16.4.4-1 Aufbau eines Variometers

geflogen werden. Mit dem Wendezeiger ist häufig die *Kugellibelle* in einem Gehäuse vereinigt. Sie gibt die Querneigung gegenüber dem resultierenden Beschleunigungsvektor an. Man bezeichnet sie daher als *Relativ-Querneigungsmesser*. Die Anzeigen beider Geräte sind für die Durchführung des Instrumentenflugs außerordentlich wichtig.

Triebwerküberwachungsanlagen. Unter diesem Begriff sind alle Anlagen zu verstehen, die zur Überwachung der Parameter der Triebwerke eines Flugzeugs bzw. zur optimalen Einstellung ihres Betriebs dienen. Dazu gehören z. B. Druckmesser (Ladedruckmessung), Drehzahlmesser, Thermometer (Zylinderkopftemperatur bei den Kolbentriebwerken, Abgastemperatur bei den Turbinentriebwerken), Brennstoffvorrats- und -verbrauchsmesser, Abgasanalysatoren. Bei Turbinentriebwerken ist die Schwingungsmeßanlage, die eine Angabe über die an den Triebwerken auftretenden Vibrationsbeschleunigungen liefert, zu den Triebwerküberwachungsanlagen zu rechnen. In großen Flugzeugen arbeiten alle diese Anlagen mit elektrischer Fernübertragung. Dabei werden potentiometrische, induktive und kapazitive Geber benutzt. Die Anzeige erfolgt meist auf Rundskalengeräten, wobei häufig mehrere Anzeigen an einem Gerät dargestellt werden.

Drehzahlmesser zeigen die Kurbelwellendrehzahl bei Kolbentriebwerken bzw. die Turbinendrehzahl bei Strahltriebwerken an. Nach dem verwendeten Meßprinzip ist eine große Zahl unterschiedlicher Drehzahlmesser verwendbar (vgl. 13.2.3.).

Druckmesser überwachen die Einhaltung vorgeschriebener Drücke der Einrichtungen von Flug- und Triebwerk. Zum Aufbau und zur Wirkungsweise von Druckmessern vgl. 13.2.5.

Flugwerküberwachungsanlagen benutzt man zur Überwachung der Parameter und der Einstellung von Trag-, Leit-, Steuer- und Fahr- bzw. Schwimmwerk. Zu ihnen gehören z. B. Stellungsanzeiger für Lande- und Trimmklappen, Fahrwerk, Höhenflosse, Druckmesser für Kabinendruck. Gegenüber früher üblichen mechanisch oder pneumatisch arbeitenden Anlagen verwenden die heute eingesetzten Flugwerküberwachungsanlagen elektronische Geber und Anzeiger.

Flugregler sind regelungstechnische Anlagen, die Stabilität und angenehme Flugeigenschaften sichern sowie bestimmte Flugaufgaben, wie Einhaltung von Flugbahn, Lage und Geschwindigkeit entsprechend eines vorbestimmten Programms, selbsttätig ausführen können, wobei von ihnen die aerodynamischen und flugmechanischen Eigenschaften des Flugzeugs und das Betriebsverhalten der Triebwerke berücksichtigt werden. Entsprechend dem Aufgabenbereich unterteilt man Flugregler in *Autopiloten* und *Dämpfer*. Beim Vorhandensein eines Autopiloten ist der Dämpfer in der Regel mit ihm in einem Gerätepaket vereinigt. Da sich die flugmechanischen und aerodynamischen Eigenschaften von Flugzeugen in der Höhe und mit der Geschwindigkeit ändern, entwickelte man Flugregler, die diese Änderungen in ihrem Regelverhalten berücksichtigen. Diese Anlagen bezeichnet man als *adaptierende Flugregler*. Moderne Passagier- und Militärflugzeuge, die in einem großen Höhen- und Geschwindigkeitsbereich operieren, sind nicht im gesamten Höhen- und Geschwindigkeitsbereich aerodynamisch eigenstabil und müssen deshalb Flugregler erhalten.

Klimaanlagen regeln Lufttemperatur, -druck und -feuchte in der Flugzeugkabine. Bei Flugzeugen mit Strahltriebwerken wird Heißluft aus dem Verdichter entnommen und über mehrere Wärmetauscher auf die erforderliche Temperatur gekühlt. Die Kühlluft erhält man aus den ersten Verdichterstufen oder man verwendet die Stauluft aus besonderen Lufteinläufen. Die entnommene Heißluft wird durch Regler geleitet, die den Druck und die Luftmenge begrenzen. Nach ausreichender Kühlung gelangt die Luft zu Mischkammern, in denen entsprechend der vorgewählten Temperatur eine Mischung von Warm- und Kaltluft erfolgt. An den Anlagen befinden sich außerdem noch Befeuchtungs- und Trocknungseinrichtungen, die die vorgewählte Luftfeuchte sichern. Bei Flugzeugen mit Kolbentriebwerken sind an den Triebwerken Verdichter zum Betrieb der Klimaanlagen installiert. Die verbrauchte Luft entweicht über die Abluftregler. Die Kabinenluft wird ≈ 15- bis 20mal je Stunde erneuert.

Hydraulikanlagen ermöglichen die Betätigung von Flugzeugeinrichtungen, für die die menschliche Handkraft nicht ausreicht oder bei deren Betätigung mit einer nicht zumutbaren Ermüdung des fliegenden Personals zu rechnen ist. Zur Kraftübertragung verwendet man Mineralöl (Hydrauliköl). Hydraulikanlagen ermöglichen die Übertragung großer Kräfte mit einfachen Elementen und die stufenlose Änderung von Arbeitsgeschwindigkeiten (vgl. 9.2.). Man verwendet sie zum Ein- und Ausfahren von Fahr-

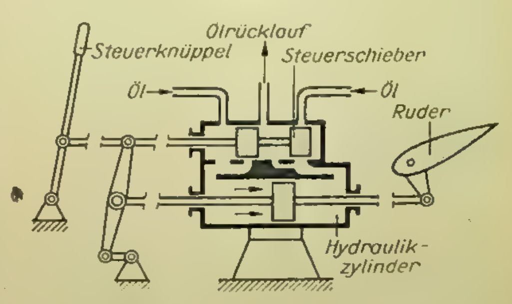


Abb. 16.4.4-3 Prinzip einer hydraulischen Rudersteuerung

werken, Landeklappen, Bremsklappen, Einströmkegeln zum Verstellen der Luftschraubenblätter, zur Kraftübertragung in der Steuerung von Quer-, Höhen- und Seitenruder, zum Öffnen und Schließen von Luken u. a. (Abb. 16.4.4-3).

Notausrüstung ist ein Begriff, der die Hilfsmittel zur Rettung von Passagieren und Besatzung in Notfällen umfaßt. Dazu gehören Hilfsmittel, die immer im Flugzeug vorhanden sind, wie Rettungsrutschen zum Verlassen des Flugzeugs, Bordapotheke, Notsender, Feuerlöscher usw., sowie die Mittel, die entsprechend der geplanten Flugstrecke vorzusehen sind, wie Seenotausrüstung, Ausrüstung zum Überleben bei Notlandung in Wüsten, in der Arktis und im Dschungel.

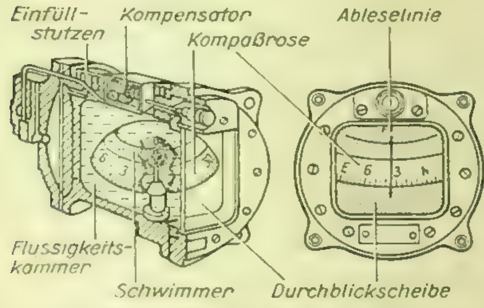


***Abb. 16.4.4-4** Aufbau eines einfachen Magnetkompasses*

Navigationsanlagen. *Kompasse* dienen zur Bestimmung des Kurses. Das klassische Gerät ist der *Magnetkompaß* (Abb. 16.4.4-4), bei dem sich eine Magnetnadel durch die gegenseitige Beeinflussung von erdmagnetischem Feld und Magnetfeld der Nadel in die Richtung des magnetischen Meridians, d. h. in die angenäherte Nord-Süd-Richtung, einstellt. Diese Bauart verwendet man in kleinen Sport- und Übungsflugzeugen ausschließlich, während sie in Verkehrsflugzeugen nur als Notkompaß benutzt wird. Der Kurs wird an der Kursrose gegenüber dem gehäusefesten Steuerstrich abgelesen. Moderne Fernkompasse für große Flugzeuge haben eine sog. *Induktionssonde* als Geber. Die Wirkungsweise dieses Gebers beruht auf der Änderung der Permeabilität von Magnetstäben in Abhängigkeit von ihrer Richtung zum Erdmagnetfeld. Entsprechend der Richtung des Erdmagnetfelds fließen Ströme durch Spulen, die auf den Magnetstäben angebracht sind. Mit Hilfe dieser Ströme ist eine Fernübertragung der Richtungsinformation möglich. Da bei dieser Kompaßbauform noch Fehler – besonders im Kurvenflug – auftreten, wurde der *Kreisel-Magnet-Kompaß* entwickelt. Er ist ein Kurskreisel, dessen Anzeige bei Normalfluglage durch die Signale eines Induktionskompasses korrigiert wird. Reine *Kreiselkompasse* beruhen auf der Tatsache, daß ein Kreisel mit 2 Freiheitsgraden, dessen Achse sich nur in der Horizontalebene

bewegen kann, seine Achse parallel zur Erdachse einstellt. Diese im Vermessungswesen angewandten Kreisel waren zunächst für Flugzeuge wegen der Anforderungen an die Lagerung des Kreisels nicht realisierbar. In den letzten Jahren sind jedoch Anwendungen in der Luftfahrt bekanntgeworden.

Funkkompasse zeigen automatisch den Winkel zwischen der Flugzeuglängsachse und der Einfallsrichtung der von einem automatisch angepeilten Sender abgestrahlten elektromagnetischen Wellen an. Funkkompasse und VOR-Anlagen sind z. Z. die wichtigsten Funknavigationsmittel der zivilen Luftfahrt.

Trägheitsnavigationsanlagen arbeiten ohne die Hilfe von Bodenanlagen. Sie ermitteln die Beschleunigungen in Nord-Süd- sowie Ost-West-Richtung und aus der zweimaligen Integration die zurückgelegte Strecke. Dazu sind 2 Beschleunigungsmesser für translatorische Beschleunigungen auf einer kreiselstabilisierten Plattform erforderlich und die entsprechenden Integratoren.

Zur Wirkungsweise von *VOR-*, *DME-*, *Loran-Anlagen*, *Doppler-Navigationsanlagen*, *Funkfeuer*, *Radaranlagen* und *Instrumenten-Landesystemen* vgl. 11.4.6.

16.4.5. Luftverkehr

Im Langstreckenpassagierverkehr hat der Luftverkehr den See- und Schienenverkehr bereits Ende der 50er Jahre überholt. Regelmäßigkeit und Pünktlichkeit dieses Verkehrszweigs haben mit über 95 % einen außerordentlich hohen Stand erreicht. Die Transportleistung eines Großraumpassagierflugzeugs mit $\approx 3{,}5 \cdot 10^5$ Passagierkilometern je Stunde übersteigt die eines großen Passagierdampfers um das 5fache und die eines Schnellzugs sogar um das 10fache. Der geringere Komfort im Vergleich mit einem Passagierschiff wird durch die 20fache Reisegeschwindigkeit mehr als ausgeglichen. Während bei einem Luxusdampfer das Verhältnis von Passagieren zu Besatzung $\approx$ 2:1 beträgt, wird im Luftverkehr, insbesondere wegen der kürzeren Reisezeit, ein Verhältnis von 15:1 bis 25:1 erreicht. Dadurch werden die Beförderungskosten günstig beeinflußt. Das überaus hohe Niveau der Sicherheit im Luftverkehr kommt dadurch zum Ausdruck, daß in den letzten Jahren im statistischen Mittel 500 Mio Passagierkilometer je tödlich verunglücktem Passagier geleistet wurden. Das ist etwa das 10- bis 20fache des Wertes, der im öffentlichen Straßenverkehr erreicht wird. Im planmäßigen Luftverkehr entfallen auf einen Unfall $\approx$ 1,5 Mio Landungen und auf einen Totalverlust $\approx$ 0,5 Mio Flugstunden. Der Anteil der Post und Frachtbeförderung am Gesamtumfang des Luftverkehrs beträgt $\approx$ 25 bis 30 %.

Luftverkehrswege. Die Erde ist in *Fluginformationsgebiete* (*FIR*) eingeteilt, deren Grenzen nur in Einzelabschnitten mit den Staatsgrenzen übereinstimmen. In diesen FIR unterscheidet man den sog. kontrollierten und unkontrollierten Luftraum. Der gesamte zivile Luftverkehr wird im kontrollierten Luftraum (Luftstraßen und Nahverkehrsbereiche der Flughäfen) durchgeführt. *Luftstraßen* sind geradlinige Korridore mit rechteckigem Querschnitt Sie sind in der Regel 18,5 km breit und beginnen in einer bestimmten Höhe über der Erdoberfläche. Sie sind am Boden in bestimmten Abständen und an End- oder Eckpunkten mit Funknavigationsmitteln (vgl. 11.4.6.) ausgerüstet und können daher auch nachts und bei schlechten Sichtbedingungen beflogen werden. Die Abstände der Luftfahrzeuge in den Luftstraßen sind vorgeschrieben. Der Höhenabstand zweier Flugzeuge auf Gegenkurs beträgt 300 m, auf gleichem Kurs 600 m bis 6 km Höhe. In den Höhen von 6 bis 9 km sind die Abstände doppelt so groß und oberhalb 9 km beträgt der Höhenabstand zweier Flugzeuge auf Gegenkurs 1000 m. Der Längsabstand richtet sich nach der technischen Ausrüstung der Luftstraße und entspricht einer Flugstrecke von 10 min bei Zeitstaffelung oder 20 km bei Radarstaffelung für Flugzeuge mit einer Geschwindigkeit von mehr als 400 km/h, sonst 10 km. Die Nahverkehrsbereiche der Flughäfen sind entsprechend den örtlichen Erfordernissen angelegt. Sie dienen zu Start und Landung, zur Durchführung der An-, Abflug- und Warteverfahren. Nahverkehrsbereiche sind mit umfangreichen Funknavigations- und Radaranlagen zur Leitung und Kontrolle des dichten Luftverkehrs und insbesondere zur sicheren Durchführung der Landung ausgerüstet.

Flughäfen dienen zur Durchführung von Start und Landung. Sie haben umfangreiche Anlagen und Einrichtungen zur Abfertigung von Passagieren, Gepäck und Fracht, zur technischen Abfertigung und Wartung der Flugzeuge, zur Betankung, Leitung und Kontrolle der Flug- und Rollbewegungen, für den Flugwetterdienst und die Feuerwehr. Auf den Flughäfen befinden sich weiterhin Dienststellen der Reisebüros, der Post, der Geld- und Kreditinstitute, der Polizei, der Paß- und Zollkontrolle (auf Flughäfen mit grenzüberschreitendem Verkehr), Restaurants, Cafés, Läden usw. Flughäfen liegen in der Regel 10 bis 50 km außerhalb der Großstädte und sind über Schnell- und Autobahnen mit dem übrigen Verkehrsnetz verbunden. Moderne Großflughäfen nehmen eine Fläche von mehr als 20 km^2 ein, ihre Beschäftigtenzahl kann über 10^4 Personen betragen, und die Anzahl der jährlich abgefertigten Passagiere übersteigt nicht selten 30 Mio. Flughäfen sind nach den ICAO-Richtlinien nach Länge, Breite und Belastbarkeit der Hauptstart- und Landebahn eingeteilt (Tab. 16.4.5-1).

Um auch bei Nacht den Flugbetrieb aufrechterhalten zu können, sind die Anflugsektoren, die Start- und Landebahnen, Rollwege und Abfertigungsflächen mit hochwirksamen Befeuerungssystemen, bestehend aus weißen, grünen, roten und blauen Lampen, ausgerüstet. Zur Kontrolle und Leitung der Rollbewegungen der Luftfahrzeuge werden auf Großflughäfen häufig spezielle Radaranlagen eingesetzt (vgl. 11.4.6.).

Luftverkehrsvorschriften. Der Luftverkehr vollzieht sich auf der Basis einer Vielzahl internationaler Abkommen und nationaler gesetzlicher Vorschriften. Zu den wichtigsten nationalen Vorschriften gehören z. B. die Luftverkehrsordnung (LVO) und die Flugsicherungsordnung (FSO). Zu den wichtigsten internationalen Abkommen gehört z. B. das „Chikagoer Abkommen" von 1944. Die aufgrund des Chikagoer Abkommens gegründete internationale Zivilluftfahrtorganisation (*ICAO*) erhielt 1946 den Status einer UN-Spezialorganisation. Weiterhin gehören dazu das „Warschauer Abkommen" von 1929 für den internationalen Luftverkehr und die Den-Haager „Konvention über die Bekämpfung der rechtswidrigen Inbesitznahme von Luftfahrzeugen" von 1970.

Tab. 16.4.5-1 ICAO-Richtlinien und -Empfehlungen für Flughäfen

Klasse	Länge der Start- und Landebahn in m	Mindestbreite in m	Kennzahl	zulässige Einzelradbelastung in kN
A	mindestens 2550	60	1	450
B	2150 bis 2449	60	2	350
C	1800 bis 2149	45	3	270
D	1500 bis 1799	45	4	200
E	1280 bis 1499	45	5	130
F	1080 bis 1279	30	6	70
G	900 bis 1079	30	7	20

16.5. Raketen- und Raumfahrttechnik

Die Raketentechnik umfaßt alle Arbeitsgebiete, die für die Berechnung, Konstruktion und den Bau von Raketen sowie zu deren Steuerung und Lenkung erforderlich sind. Mit der Raketenantriebstechnik bildet sie die wichtigste Voraussetzung für die Raumfahrttechnik, zu der auch die Raumflugnavigation gehört. Durch sie werden die Gesetzmäßigkeiten im Weltraum und die Eigenschaften der Himmelskörper (Himmelsmechanik) berücksichtigt. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse und der wirtschaftliche Nutzen rechtfertigen die erheblichen Aufwendungen für die Realisierung der Ziele der Raumfahrt. Die Raketen- und Raumfahrttechnik gestatten gegen-

wärtig, bemannte Raumflugkörper auf Erdumlaufbahnen und auf den Mond zu bringen, unbemannte Raumflugkörper in den erdnahen Raum und zu den Planeten des Sonnensystems zu schicken.

16.5.1. Grundlagen des Raketenantriebs

Raketenantriebe müssen hohe Fluggeschwindigkeiten zur Überwindung der Erdanziehung und des Luftwiderstands sowie zur Fortbewegung der Raketenmasse entwickeln, hohe Funktionsfähigkeit im Hochvakuum des Kosmos besitzen und kurzfristig wieder zündbar sein. Der Rückstoßantrieb ist z. Z. die einzige Antriebsart, die im Kosmosvakuum einen Raumflugkörper antreiben kann. Er benötigt kein äußeres Medium, da das Triebwerk die *Stützmasse*, das Arbeitsmittel, aus der Rakete gerichtet ausstößt. Die Kraft (*Schub*), die die Rakete dabei in entgegengesetzter Richtung in Bewegung versetzt, ist um so größer, je größer die vom Raketentriebwerk pro Zeit ausgestoßene Masse ist und mit je höherer Geschwindigkeit die Masse ausgestoßen wird. Bei den *thermochemischen Raketentriebwerken* entsteht die Stützmasse (gasförmige Produkte) in einem energetischen Prozeß zwischen Brennstoff und Oxydationsmittel. Die dabei entstehende thermische Energie wird in der Triebwerksdüse durch Entspannen der heißen Verbrennungsgase in kinetische Energie umgewandelt. Zu den thermochemischen Raketenantrieben gehören die *Flüssigkeits-* und *Feststoff-Raketentriebwerke*. *Kernenergietriebwerke* (thermische Raketentriebwerke) und *elektrische* (elektrothermische und -statische) *Raketentriebwerke* befinden sich noch in der Entwicklung.

Rückstoßprinzip. Das 3. Newtonsche Axiom, das Gesetz von der Gleichheit von Wirkung (actio) und Gegenwirkung (reactio), besagt, daß jede wirkende Kraft eine gleich große, in entgegengesetzter Richtung wirkende Gegenkraft bedingt (*Reaktionsprinzip*). Dies wird bei dem Raketenantrieb genutzt, indem durch Abstoßen einer Teilmasse vom abgeschlossenen System der Restmasse (Rakete mit Raumflugkörper) solch ein Impuls gegeben wird, daß die Restmasse die gewünschte Geschwindigkeit erreicht.

Impulssatz. Die Bewegungsgröße Impuls I ist das Produkt aus Masse m und Geschwindigkeit v eines Massepunktes: $I = m \cdot v$. Bei zeitlich variabler beschleunigender Kraft ist der Impuls dem Kraftstoß und seiner Dauer gleich: $I = \int F dt$. Nach dem *Impulserhaltungsgesetz* bleibt der Impuls eines Körpers unveränderlich, sofern keine äußeren Kräfte auf den Körper einwirken. Das Impulserhaltungsgesetz gilt auch für Kräfte, die nur zwischen 2 Körpern im abgeschlossenen System wirken, d. h. der Gesamtimpuls bleibt konstant. Werden von 2 Massen m_1 (Rakete) und m_2 (Gasmasse) die Geschwindigkeiten Δv_1 und Δv_2 geändert, ist nach dem Impulssatz die Impulsänderung gleich Null, $m_1 \Delta v_1 + m_2 \Delta v_2 = 0$, d. h., nimmt die Ausströmgeschwindigkeit Δv_2 der Gasmasse m_2 zu, so steigt die Geschwindigkeit Δv_1 der Raketenmasse m_1 entsprechend $\Delta v_1 = -(m_2 \cdot \Delta v_2)/m_1$.

Raketengrundgleichung. Sie definiert die maximal erreichbare Endgeschwindigkeit v_{max} einer Rakete als Funktion von der *Ausströmgeschwindigkeit c* und vom *Massenverhältnis* zwischen den Massen der Rakete mit (M_0) und ohne Treibstoff (M_1): $v_{max} = c \cdot \ln M_0/M_1$. Die von *K. Ziolkowski* 1903 aufgestellte Grundgleichung der Raketentechnik gilt nur im kräftefreien Raum (ohne Luftwiderstand und Anziehungskräfte anderer Himmelskörper) und setzt voraus, daß der Raketentreibstoff einer einstufigen Rakete restlos verbraucht wird. Man bezeichnet die Dauer der Treibstoffverbrennung als *Brennzeit*, das Ende der Antriebszeit als *Brennschluß* und die zugehörige Endgeschwindigkeit als *Brennschlußgeschwindigkeit* bzw. theoretisches *Antriebsvermögen*. Um das Massenverhältnis M_0/M_1 zu vergrößern, muß der Treibstoffanteil an der Startmasse M_0 (einschließlich Nutzlast) einer Rakete möglichst groß sein. Das kann durch den Einsatz dichter Treibstoffe bzw. durch Leichtbauweise der Rakete erreicht werden. Da der Masseeinfluß als logarithmische Rechengröße viel geringer ist als der durch die Erhöhung der Ausströmgeschwindigkeit der Verbrennungsgase, ist es zweckdienlicher, nach neuen Treibstoffen zu suchen. Der Stand der Technik ermöglicht z. Z. Ausströmgeschwindigkeiten von durchschnittlich 3,2 bis 3,5 km/s bei festen und flüssigen Raketentreibstoffen.

Kenngrößen für Raketensysteme

Raketengrundgleichung unter dem Einfluß von Anziehungskräften:	$v_{max} = (c \cdot \ln M_0/M_1) - (\pm g_n \cdot t)$
Treibstoffverhältnis:	$\tau = M_{Treibstoff}/M_0$
Schubverhältnis:	$\delta = M_0/S$; $S = m\,dv/dt$
Grundverhältnis:	$G_v = M_0/M_N$
Nutzmassefaktor	$\ell/G_v = M_N/M_0$

16.5.2. Technik des Raketenantriebs

Stufenprinzip. Setzt man in die Raketengrundgleichung die durchschnittliche Ausströmgeschwindigkeit von 3,5 km/s ein, dann ergibt sich ein Massenverhältnis von ≈ 23. Interplanetare Flugmissionen, wie z. B. zum Mond und zurück, benötigen ein viel größeres Antriebsvermögen, was bei Einstufenraketen zu den völlig irrealen

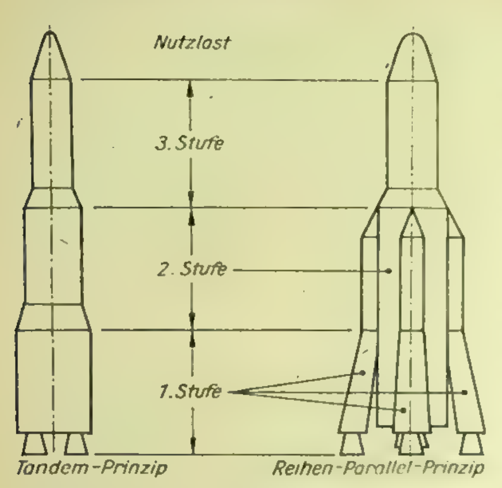


Abb. 16.5.2-1 *Stufenanordnungen*

Massenverhältnissen von 500 bis 1000 führen würde. Das *Stufenprinzip* überwindet die Schwierigkeiten, ein optimales Massenverhältnis bei hoher Endgeschwindigkeit zu erzielen. Die einzelnen Stufen von *Mehrstufen-Raketen* werden entsprechend ihrer Zündfolge numeriert. Die *Startstufe* als 1. Stufe beschleunigt mit ihrem Antriebsvermögen die Mehrstufen-Rakete auf die Brennschlußgeschwindigkeit der 1. Stufe. Mit dem Abbrennen der 1. Stufe bzw. kurz danach wird die 2. Stufe gezündet, deren Antriebsvermögen sich zu dem der 1. Stufe addiert usw. Dadurch ist es möglich, die für die Raumfahrt erforderlichen Geschwindigkeiten von 8 bis 11,2 km/s und mehr zu erreichen. Die optimale Stufenteilung läßt sich aus der idealen Geschwindigkeit für ein bestimmtes *Grundverhältnis* berechnen. Um zu hohe Stufenzahlen zu vermeiden, muß durch geeignete Maßnahmen das Grundverhältnis so klein wie möglich gehalten werden, allgemein $G_V \leqq 100$. Man spricht auch dann von einem Stufenprinzip, wenn Antriebsanlagen u. a. Konstruktionsteile (Leermasse) nach einem Zeitfolgeprogramm abgetrennt werden, um so das Antriebsvermögen zu steigern (Abb. 16.5.2-1).

Raketentriebwerke. ***Flüssigkeits-Raketentriebwerke.*** Die flüssigen *Treibstoffkomponenten* (Oxydator und Brennstoff) befinden sich in separaten Behältern und werden durch Pumpen oder Druckgas über Regelventile und Leitungen der Brennkammer zugeführt und hier verbrannt. Die Druckgasförderung wird wegen der begrenzten Dimensionierung des Druckgasbehälters nur für kleine Raketen oder Raketenstufen angewendet. Bei der aufwendigeren Pumpenförderung werden meist Turbinen als Antrieb für die Brennstoff- und Oxydatorpumpen eingesetzt, deren Arbeitsgas (Wasserstoffperoxid oder Treibstoffkomponenten selbst) von einem Gasgenerator geliefert wird. Bei der Verbrennung des Treibstoffkomponentengemischs in der *Brennkammer* (Abb. 16.5.2-2) entstehen hochgespannte Gase, die durch den Düsenhals ins Freie strömen, wobei sie in der *Entspannungsdüse* ihren Druck (3 bis 7 MPa, Hochdrucktriebwerke bis 15 MPa) in Geschwindigkeit umsetzen, wodurch die Schubwirkung auf die Rakete entsteht. Flüssigkeitstriebwerke gestatten den Einsatz *hochenergetischer Treibstoffkombinationen* (Flüssigsauerstoff/Flüssigwasserstoff). Die damit verbundenen hohen Druck- und Temperaturbelastungen (> 3500 K) sind für die relativ kleine technische Anlage konstruktiv noch zu beherrschen. Gegenüber den Feststoff-Raketenantrieben läßt sich bei Flüssigkeitsantrieben der Verbrennungsvorgang besser regeln. Die stufenlose Schubregelung hat große Vorteile bei komplizierter Flugführung. Durch hochtemperaturbeständige Werkstoffe, hochwirksame Kühlverfahren und durch die Entwicklung zuverlässiger Konstruktionen zur Gewährleistung einer sicheren Zündung und einer kontinuierlichen Verbrennung selbst bei hohem Treibstoffdurchsatz wurden Flüssigkeitstriebwerke mit extrem hohem absolutem Schub entwickelt, die Brennzeiten von 10 min und länger gestatten. Durch Bündelung von Flüssigkeits-Raketentriebwerken lassen sich schubstarke Antriebssysteme schaffen, wie z. B. bei der *Trägerraketen-Reihe „Wostok – Sojus"* (UdSSR) und bei der Trägerrakete *„Saturn 5"* (USA). Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Treibstoffe ergeben sich jedoch langwierige Startvorbereitungen.

Feststoff-Raketentriebwerke sind die einfachsten aller Raketenantriebe. Die festen Treibstoffkomponenten lassen sich direkt in der Brennkammer in beliebiger Konfiguration einpressen, -gießen oder -bringen. Feststoff-Raketentriebwerke benötigen keine Treibstoffbehälter und Zuführeinrichtungen, wodurch sich die Betriebs-

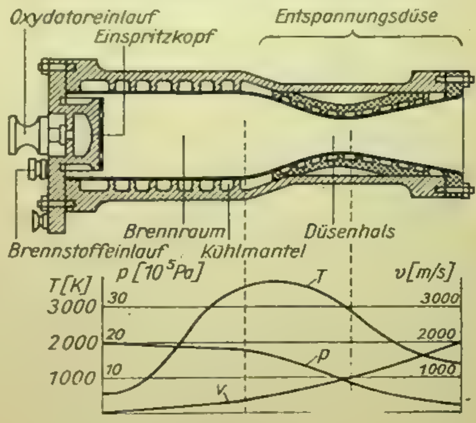


Abb. 16.5.2-2 *Brennkammer*

sicherheit erhöht und die Störanfälligkeit sinkt. Der Bedienungsaufwand vor dem Start ist außerordentlich unkompliziert, so daß diese Antriebe ständig einsatzbereit sind. Sie lassen sich zu größeren Schubeinheiten bündeln, außerdem kann man Feststofftriebwerke mit 6 m Durchmesser und einigen hundert Tonnen Treibstoffmasse herstellen (*Segmentbauweise*). Nachteilig sind das relativ geringe Leistungsvermögen, der kaum regelbare Schubverlauf, das temperaturabhängige Leistungsverhalten und die kurzen Brennzeiten von max. 2 bis 3 min. Aufgrund der Vorteile hinsichtlich ständiger Einsatzbereitschaft, einfacher Lagerung und Handhabung werden die Feststofftriebwerke eingesetzt für Raketenwaffen, Hilfs- und Sonderaufgaben (*Fluchtraketentriebwerke*), Höhen- u. a. Forschungsraketen, kleine Satelliten-Trägerraketen (USA, Japan), Startstufen von Großraketen, z. B. „Titan 3C" (USA).

Noch im Erprobungsstadium befinden sich die *Hybridtriebwerke*, zumeist mit flüssigem Oxydator und festem Brennstoff, und *Tribidtriebwerke* (Dreikomponenten-Treibstoffe, z. B. Fluor-Lithium-Wasserstoff). Bei ihnen bereitet die Beherrschung der Gemischbildung, des Strömungsverlaufs und der zahlreichen chemischen und thermischen Reaktionen in der Brennkammer Schwierigkeiten.

Treibstoffe. Der Raketentreibstoff besteht aus 2 Komponenten, *Brennstoff* und *Oxydator*, die grundsätzlich in allen 3 Aggregatzuständen verwendbar sind.

Feste Raketentreibstoffe. *Homogene Treibstoffe* sind chemische Einstoffsysteme (*Monergole*), die den Sauerstoff, an den Brennstoff gebunden, selbst enthalten. Wegen ihrer Hochexplosivität werden die Einbasis-Treibstoffe Zellulosenitrat, Glyzerintrinitrat (vgl. 4.13.2.) kaum verwendet, sondern zu Doppelbasis-Treibstoffen, wie Zellulosenitrat-Glyzerintrinitrat-Gemisch und Diäthylenglykoldinitrat, übergegangen. Homogene Treibstoffe werden in kleineren und mittleren Feststofftriebwerken (Raketenwaffen) eingesetzt. *Heterogene Treibstoffe* werden durch mechanische Mischung von Brennstoff und Oxydator (Ammoniumnitrat, Kaliumchlorat, Ammonium- und Natriumperchlorat) hergestellt. Als Brennstoff werden Stoffe verwendet, die sowohl günstige Verbrennungseigenschaften als auch die Funktion eines plastischen „Binders" haben (wasserstoffreiche organische Hochpolymere, wie Polybutadiene, Polyurethane). Durch das Beimengen von pulverisierten Leichtmetallen (Aluminium, Magnesium) kann der spezifische Impuls der heterogenen Treibstoffe wesentlich gesteigert werden.

Flüssige Raketentreibstoffe. Als *Einstoff-Flüssigkeitstreibstoffe* werden nur Wasserstoffperoxid H_2O_2 und Hydrazin N_2H_4 praktisch angewendet. Sie benötigen zum Anregen der Zersetzungsreaktion einen *Katalysator*. Hydrazin benötigt außerdem noch Stickstofftetroxid als Zündstoff. Wegen ihres niedrigen spezifischen Impulses sind sie für Hauptantriebe von Trägerraketen ungeeignet, sehr gut dagegen für *Bahnkorrekturtriebwerke* von *Raumsonden* (Hydrazin für die Sonden „Ranger" und „Mariner"). Treibstoffe, die nur bei Anwesenheit eines Katalysators reagieren, werden als *Katergole* bezeichnet.

Zweistoff-Flüssigkeitstreibstoffe sind Kombinationen eines festen Brennstoffs und eines flüssigen Oxydationsmittels (Hybridsysteme) oder umgekehrt (*Lithergole*). Ihr spezifischer Impuls von 2 500 bis 4 000 Ns/kg läßt sie als Trägerraketentreibstoff gut einsetzen. Für Oxydatoren kommen in Frage: flüssiger Sauerstoff, Flüssigfluor und Verbindungen, die eine der beiden Elemente in hoher Konzentration enthalten, z. B. Salpetersäure HNO_3, Stickstofftetroxid N_2O_4, Chlortrifluorid ClF_3. Brennstoffe sind Kerosin, Hydrazin und -derivate, Flüssigwasserstoff, Methanol und Äthanol. Treibstoffe, deren Komponenten beim Zusammentreffen spontan durch Selbstentzündung reagieren, werden als *Hypergole* bezeichnet.

Die Treibstoffe werden nach folgenden Kriterien beurteilt: Aggregatzustand, Energiegehalt, entwickelte Gasmenge je Liter Treibstoff, spezifischer Impuls, der vom Treibstoff je Kilogramm und Sekunde erzeugt wird (Maßeinheit Ns/kg), Dichte, gute Herstell- und Lagerungsmöglichkeit, leichte Handhabung, geringe Kosten, Explosibilität, Korrosionswirkung.

Raketensteuerung und -lenkung. Zum Erreichen einer *Flugbahn* nach dem vorgegebenen Flugprogramm müssen Raketen während der Aufstiegsphase im *Antrieb* und in ihrer *Fluglage* (Flugstabilisierung) geregelt werden. Die *Antriebsregelung* erfolgt nach dem Prinzip der *adaptiven Lenkung*, d. h., der Antrieb der einzelnen Raketenstufen wird so gesteuert, daß die angestrebten Brennschlußwerte der letzten Stufe weitgehend erreicht werden (*Antriebs- und Schubvektorregelung*). Die *Flugstabilisierung* sorgt für die Fixierung einer vorgegebenen Lage der Rakete während des Antriebs und gleicht Störfaktoren, wie Luftkraftmomente, Schubschwankungen, Schwerpunktveränderungen infolge Treibstoffverbrauch u. a., aus.

Jede der 3 aufeinander senkrecht stehenden Achsen eines Raketenkörpers, die *Längs-* oder *Rollachse*, die *Quer-* oder *Stampfachse* und die *Hoch-* oder *Gierachse*, wird durch *Kreisel* stabilisiert (*orthogonales Bezugssystem*). Kombiniert mit 3 hochempfindlichen Beschleunigungsmessern, deren Meßrichtungen mit den Achsen des Bezugssystems übereinstimmen, befinden sie sich auf einer kardanisch aufgehängten *Geräteplattform*, der *kreiselstabilisierten Trägheitsplattform* (Abb. 16.5.2-3), neben einer Lotrichtungsanzeige und einem

Prisma für die Plattformjustierung. Die Kreisel stabilisieren die Geräteplattform für die Beschleunigungsmesser während des Fluges in einer raumstabilen Position. Die notwendigen Lagereferenzwerte werden durch Abgriff an der kardanischen Aufhängung geliefert (*Trägheitsnavigationssystem*). Treten Abweichungen von der vorgesehenen Flugbahn auf, Rotation um die Koordinaten oder Translation parallel zu den Koordinaten, werden diese Bewegungen von den 3 Beschleunigungsmessern erfaßt, und zwar für die einzelnen Koordinaten getrennt nach Größe und Richtung. Durch einfache Integration der Beschleunigungsmeßwerte über die Zeit erhält man die Geschwindigkeit und durch doppelte Integration über die Zeit den zurückgelegten Weg (Ort der Rakete). *Flugbahn-Rechengeräte* liefern durch abschließende Verstärkung die erforderlichen Stellsignale für die Stellmotore der Lenkorgane. *Stellmotore* (Abb. 16.5.2-4) wirken vorwiegend elektrohydraulisch, d. h., die elektrischen Stellsignale betätigen Steuerkolben in einem Hydraulikkreislauf (vgl. 9.2.), wodurch infolge Druckdifferenz ein Arbeitskolben bewegt wird (lineare Bewegung), der über eine Kurbel und Steuerwelle die gewünschte Verstellung (Rotationsbewegung) eines *Lenkorgans* bewirkt. Die gebräuchlichsten technischen Hilfsmittel zur Lenkung im freien Raum sind kardanisch gelagerte, schwenkbare *Haupt-* und *Hilfstriebwerke* (Abb. 16.5.2-5), eine *schwenkbare Entspannungsdüse* oder der *schwenkbare Düsenmündungsring* des Haupttriebwerks, schwenkbare *Strahlruder* hinter der Düse, *gasdynamische Schubvektorsteuerung* durch Einspritzen eines Hilfsgases hinter dem Düsenhals.

16.5.3. Raumflugkörper

Raumflugkörper sind künstliche Körper beliebiger Form für Flugmissionen im Weltraum außerhalb der Lufthülle der Erde. Sie werden als Nutzlast mittels *Trägerraketen* in ihre vorbestimmte Flugbahn gebracht. Während des Durchflugs durch die Lufthülle sind sie von später abzusprengenden leichten *Verkleidungselementen* vor Beschädigungen geschützt. Die Ausrüstung der Raumflugkörper besteht je nach Bestimmungszweck aus wissenschaftlichen An-

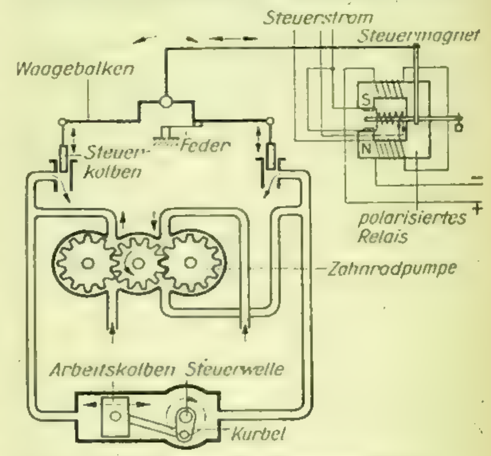


Abb. 16.5.2-4 Elektrohydraulische Steuermaschine

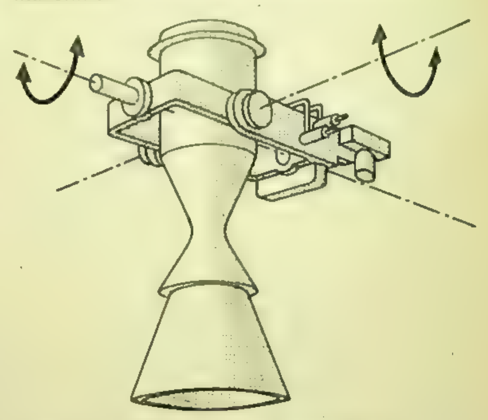


Abb. 16.5.2-5 Kardanisch gelagertes Hilfstriebwerk zur Lagesteuerung

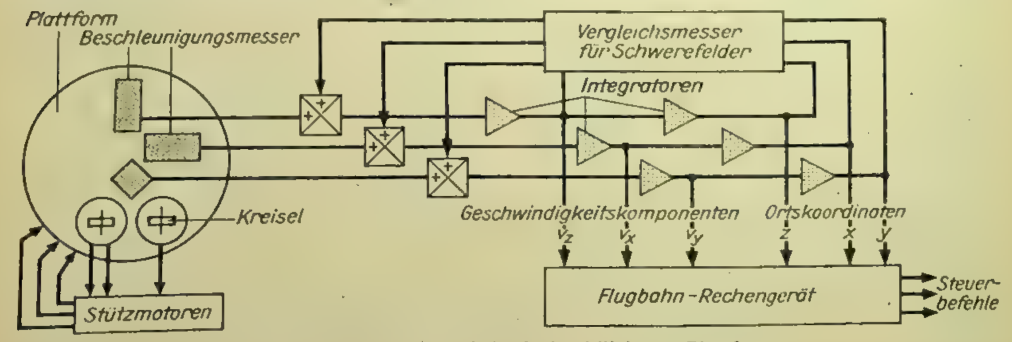


Abb. 16.5.2-3 Trägheitsnavigationssystem mit kreiselstabilisierter Plattform

lagen und Geräten, den zu ihrem Betrieb erforderlichen Energiequellen, bei bemannten Raumflugkörpern den für die Erhaltung der Lebensfunktionen der Besatzung notwendigen Einrichtungen sowie den erforderlichen Steuer- und Antriebseinrichtungen für *Bahnkorrekturen* und *Rückkehrmanöver.*

Flugbahnen von Raumflugkörpern. Der Raketenantrieb hat zur Fortbewegung der Raketenmasse den *Luftwiderstand* und die *Gravitationskraft* der Erde zu überwinden. Die für die Bewegung eines Raumflugkörpers in einem zentralen Gravitationsfeld gesetzmäßigen Beziehungen gelten auch für alle antriebslosen Bewegungen im Weltraum. Hierfür sind das *Newtonsche Gravitationsgesetz* und das *Newtonsche Trägheitsprinzip* gleichermaßen bestimmend, d. h., außerhalb des Erdgravitationsfelds unterliegt der Raumflugkörper dem Einfluß kosmischer Gravitationszentren (Sonne, Planeten, Planetenmonde u. a.). Obwohl zur Verringerung des Schwerkrafteinflusses eine „flache" Aufstiegsbahn und große Anfangsgeschwindigkeit erforderlich wären, erfolgt der Start von großen Raketen stets senkrecht, da er so am einfachsten ausführbar ist und den geringsten Aufwand für die Raketenkonstruktion und für die Startanlagen erfordert. Mit senkrechtem Aufstieg und geringer Anfangsbeschleunigung wirkt sich der Luftwiderstand kaum aus. Das Umlenken der Trägerrakete geschieht bei wachsender Geschwindigkeit im Anschluß an den senkrechten Teil der Flugbahn zuerst mit größerer und dann mit immer kleiner werdender Winkelgeschwindigkeit.

Bestimmend für die Form der Flugbahn und damit für die Reichweite von Raumflugkörpern ist die *Brennschlußgeschwindigkeit* des Trägerraketensystems. Unter Vernachlässigung des Luftwiderstands reicht die Brennschlußgeschwindigkeit von 7,912 km/s (*Minimum-Kreisbahngeschwindigkeit*) aus, um *Erdsatelliten* in eine nahe der Erdoberfläche umlaufende Flugbahn zu bringen. Bei dieser wie auch bei allen sonst üblichen Kreisbahngeschwindigkeiten heben sich Zentrifugalkraft des Raumflugkörpers und die Anziehungskraft der Erde gerade auf, so daß kein weiterer Antrieb für den Raumflugkörper auf seiner mehr oder weniger elliptischen Bahn um die Erde notwendig ist (Abb. 16.5.3-1). Liegt die Bahnhöhe zu niedrig, bewirkt der Luftwiderstand eine Abbremsung des Raumflugkörpers, wodurch dieser an Bahnhöhe verliert, in die Erdatmosphäre eindringt und verglüht, sofern keine Rückführung zur Erde (vgl. Rückführungstechnik) geplant ist. Um die Lebensdauer des Raumflugkörpers zu erhöhen, sind Flugbahnhöhen von > 180 km mit Brennschlußgeschwindigkeiten > 7,912 km/s erforderlich. Die Flugbahnen werden mit zunehmender Brennschlußgeschwindigkeit stärker elliptisch mit deutlich ausgeprägtem *Perigäum* (erdnahester Bahnpunkt) und *Apogäum* (erdfernster Bahnpunkt), wie sie im Bereich bis 11,2 km/s für

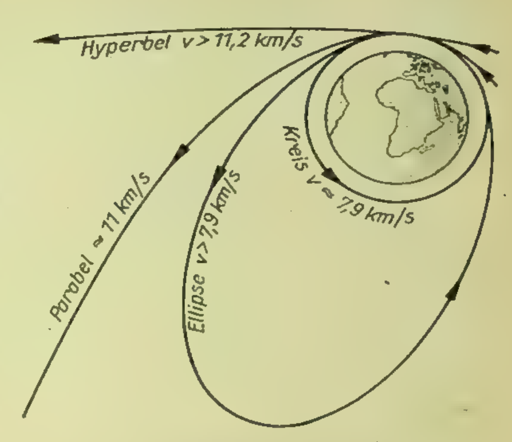


Abb. 16.5.3-1 Bahngeschwindigkeiten und zugehörige Flugbahnen

die elliptischen Flugbahnen von Mond-, Planeten- und Raumsonden erforderlich sind. Zum endgültigen Verlassen des Erdschwerefelds ist die planetare Fluchtgeschwindigkeit von v_F = 11,2 km/s notwendig. $v^2_F = 2g_0r_0$, wobei r_0 der mittlere Erdradius und g_0 die mittlere Erdschwerebeschleunigung ist. v_F ist also masseunabhängig. Die Flugbahn des Raumkörpers, der zum künstlichen *Planetoiden* wird, ist *parabelförmig. Hyperbelförmige Flugbahnen* ergeben sich bei Brennschlußgeschwindigkeiten > 11,2 km/s (die solare Fluchtgeschwindigkeit ist > 16,5 km/s). Die *Neigung der Flugbahn* (Umlaufbahn) eines Flugkörpers gegen die Erdäquatorebene ist zahlenmäßig gleich der größten nördlichen bzw. südlichen geografischen Breite, die der Flugkörper überfliegt. Je niedriger die mittlere Bahnhöhe ist, um so kürzer ist die Umlaufzeit. Ist die *Satellitenumlaufzeit* gleich der Erdrotationsperiode, so spricht man von einer *Synchronbahn* des Satelliten. Für globale Funkverbindungen bzw. für Relaissysteme (vgl. Molnija-Satelliten) sind für Raumflugkörper *geostationäre Synchronbahnen*, deren Bahnebene in der Äquatorebene liegt, oder *quasistationäre Synchronbahnen* notwendig. Letztere Bahnen haben eine von Null abweichende Bahnneigung, so daß der Satellit während eines Umlaufs Pendelbewegungen nach Norden und Süden längs eines Längenkreises als Symmetrieachse ausführt. Störgrößen für die Flugbahnen sind u. a. die Erdabplattung und der *solare Strahlungsdruck. Parkbahnen* (Erd- oder Planetenumlaufbahn) benutzt man zur Erhöhung der Sicherheit von Raumflugunternehmen, um aus diesen dann in die *interplanetare Übergangsbahn* zu starten. Die ersten Mondsonden, „Sonde 5" und „Sonde 6" (UdSSR), wurden zum einfachen Umfliegen des Mondes ohne Verweilen in einer

Parkbahn gestartet (Abb. 16.5.3-2). Die „Apollo-Unternehmen" der USA benutzten das Zwischenschalten von Parkbahnen um den Mond, um eine günstige Konstellation Erde—Mond für den Rückflug abzuwarten. Die optimale Bahnvariante bedingt die Festlegung eines genauen *Starttermins*. Damit die Flugbahn von Planetensonden die Bahn des Planeten zum Zeitpunkt der größten Annäherung schneidet oder berührt, ergibt sich unter Berücksichtigung vorhandener Antriebsreserven und der Variation der Bedingungen für den Bahninjektionsvektor (Richtung und Geschwindigkeit) ein zeitlicher Bereich für den Starttermin, das sog. *Startfenster*. Wegen der Bewegungen der Planeten und der Erde bieten sich meist nur in gewissen Abständen günstige Starttermine, z. B. zum Mond aller 4 Wochen, zur Venus nach 20 Monaten, zum Mars nur etwa aller 26 Monate. *Flugbahnkorrekturen* werden bei Missionen zum Mond oder zu anderen Planeten erforderlich, um die Bahnwerte nach funktechnischen Flugdatenvermessungen zu optimieren. Dies geschieht in möglichst großer Entfernung von der Erde und vom Zielplaneten (geringe Fluggeschwindigkeit), um wenig Treibstoff für das wiedergezündete Haupttriebwerk oder für kleinere Korrekturtriebwerke zu verbrauchen.

Flugführung von Raumflugkörpern. Unter *Flugführung* sind diejenigen Maßnahmen und technischen Zurüstungen zu verstehen, die zur Steuerung und Regelung aller Betriebsfunktionen sowie des Flugablaufs vom Start bis zum Ende der Mission des Raumflugkörpers dienen. Grundlage aller technischen Maßnahmen ist das *Flugprogramm* (Missionsziel, rechnerische Zieldaten für die Flugbahn). Prinzipiell und verfahrenstechnisch ist die Flugführung von Raumflugkörpern der Raketen-Flugregelung gleich oder weitgehend identisch, jedoch entsprechend der Aufgabenstellung umfangreicher. Neben Fluglage- und Bahnregelung ergeben sich besonders für *Rückkehrflugkörper* erhöhte Anforderungen an die Rückführtechnik und das Landeverfahren.

Die *Fluglageregelung* hat die Aufgabe, dem Raumflugkörper im Freiflug eine definierte Lage im Raum zu gewährleisten, die *Solarenergieanlagen* auf die Sonne auszurichten, die Antennen auf bestimmte *Flugüberwachungsstationen* (Tafel 69) auf der Erde einzustellen, den Raumflugkörper für erforderliche Bahnkorrekturen zu drehen und Störmomente auszugleichen.

Die *passive Lageregelung* nutzt natürliche Einflußkräfte aus: das Erdschwerefeld für die *Gravitationsgradienten-Stabilisierung* durch hantelförmige Satelliten, die Feldlinien des Erdmagnetfelds zur *magnetischen Stabilisierung* durch einen fest eingebauten Permanentmagnet, die Luft im Bereich der Hochatmosphäre zur *aerodynamischen Stabilisierung* (Heckstabilisator bei „Kosmos 149") und der Sonnenstrahlungsdruck für Strahlungsdruck-Stellflächen, z. B. bei Mariner 4".

Aktive Lageregelung erreicht man durch künstliche Drehmomentengeber, die in einem geschlossenen Regelkreis wirken. Spezielle *Sensoren*, meist 3 lichtempfindliche Geber, sind für jede Koordinate auf einen hell leuchtenden Himmelskörper (Sonne, helle Fixsterne) ausgerichtet. Ist das jeweilige Fotoelement des Stabilisators über Fernrohr senkrecht zum Leitstern ausgerichtet, hat der darin entstehende Strom die maximale Stromstärke. Weicht der Flugkörper von der Richtung ab, wird der Strom schwächer. Über Verstärker und Wandler ergehen Befehle an Steuerorgane, die den Raumflugkörper ausrichten, bis der Strom wieder sein Maximum hat, die erreichbare Genauigkeit liegt bei 1 Bogensekunde. Als Lageanzeiger werden komplette Trägheitsplattformen (vgl. Abb. 16.5.2-3) angewendet. Für unbemannte Raumflugkörper werden als *Lageregelungstriebwerke Kaltgasdüsen* eingesetzt, die durch ausströmendes Druckgas, meist Stickstoff, tangentiale Drehmomente um den Raumflugkörper-Masse-

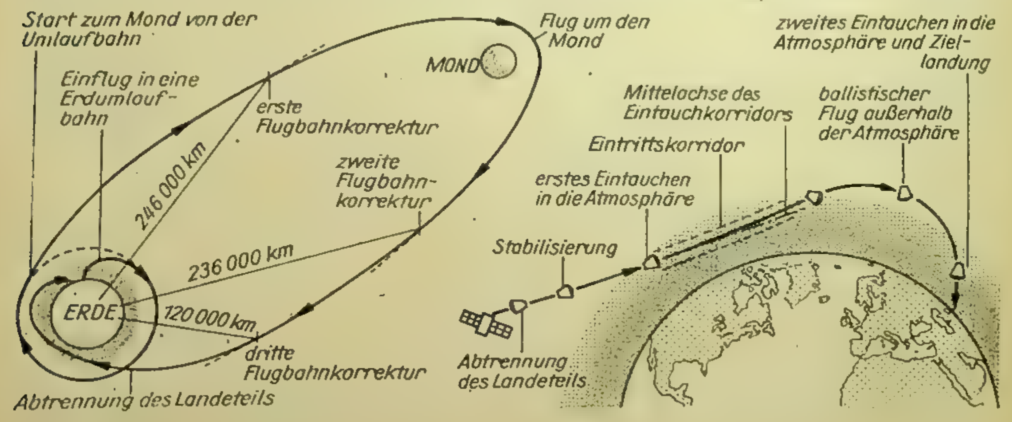


Abb. 16.5.3-2 Flugbahn der sowjetischen Mondsonde „Sonde 6" und Manöver ihres Landeteils

schwerpunkt bewirken. Für größere Raumflugkörper werden *Hydrazin-Lageregelungstriebwerke* mit 2 oder 4 Düsen in einem starren Block vereint eingesetzt. Mehrere Düsenblöcke symmetrisch zum Schwerpunkt des Raumflugkörpers angeordnet ermöglichen schnellen Pulsbetrieb und extrem kurze Impulse.

Bahnregelung. Die Korrektur der Flugrichtung und -geschwindigkeit erfolgt mit einem in der Längsachse des Raumflugkörpers wirkenden und wiederzündbaren, schubstarken Bahnmanövertriebwerk auf thermochemischer Zweistoffbasis. Auch hier werden *Trägheits-* oder *Astronavigation* angewendet bzw. die Regelung erfolgt über *optische Ortung* von Beobachtungsstationen auf der Erde. Die *Funkortung* mit einer *Doppler-Frequenzmessung* an einem Bordsender reicht für interplanetare Flüge nicht aus, deshalb wendet man die *Zweiweg-Doppler-Messung* mit *Transpondern* im Raumflugkörper an. Voraussetzungen sind sehr hohe Frequenzen, enge Bündelung des Richtstrahls durch Spezialantennen, hochleistungsfähige Parabol-Empfangsstationen und hohe Frequenzstabilität des Bordtransponders. Die feststellbare Positionsgenauigkeit beträgt in Mondnähe 0,1 bis 0,2 Bogensekunden.

Die *Rendezvoustechnik* erhöht die Anforderungen an Flug- und Bahnregelung, da 2 auf separaten Freiflugbahnen befindliche Raumflugkörper durch Bahn- und Lagekorrekturen einander angenähert werden müssen. Für *Kopplungsrendezvous* sind *Kopplungsadapter* notwendig. Bei der Kopplung unbemannter Raumflugkörper liefert ein vollautomatisches und mit einem vorprogrammierten Rechner ausgestattetes Bordsystem die Stelldaten für das Flugregelsystem (z. B. Kopplung „Kosmos 186" mit „Kosmos 188", „Kosmos 212" mit „Kosmos 213"). Bemannte Raumflugkörper verfügen über eine automatische Steuerung gekoppelt mit Handsteuerung (größere Gesamtzuverlässigkeit). In der letzten Annäherungsphase erfolgt die Steuerung vorwiegend durch Handsteuerung.

Die *Rückführungstechnik* von Raumflugkörpern umfaßt i. allg. die Bahndatenkontrolle, Flugregelung (*Bremsmanöver*) zum Eintauchen in die Erdatmosphäre und Maßnahmen für den Abstieg durch die dichtere Atmosphäre bis zum Aufsetzen auf die Erdoberfläche (Wasser- oder Festland-Landung) Die *aerodynamische Eintauchbahn* ist vorteilhafter als die ballistische, u. a. geringere Andruckbelastung auf die Besatzung. Als günstigste Form der Stirnfläche des Eintauchkörpers hat sich eine stumpfe Vorderbasis mit *Hitzeschild* erwiesen (gute Flugstabilität, günstiges Auftrieb-Widerstands-Verhältnis u. a.). *Eintauchgeschwindigkeit* und *-winkel* sind entscheidende Größen insbesondere bei der Rückführung aus interplanetaren Bahnen (Eintauchgeschwindigkeit bei lunaren Missionen $\approx 11{,}5$ km/s). Durch die Flugregelung muß der Eintauchwinkel genau eingehalten werden. Der

mögliche *Eintauchkorridor* (vgl. Abb. 16.5.3-2) wird begrenzt durch die obere Grenze, bei der die Bremswirkung der Erdatmosphäre gerade noch ausreicht, den Eintauchkörper in die Abstiegsbahn zu zwingen. Die untere Grenze ergibt sich aus der maximalen thermischen und sonstigen Belastbarkeit des Rückkehrkörpers. In der letzten Phase der Abstiegsbahn werden *aerodynamische Landehilfsmittel* (Fallschirmsysteme [Tafel 96], Bremsflächen) und *Feststoff-Bremstriebwerke*, z. B. beim Woschod-Raumflugkörper, angewendet.

Unbemannte Raumflugkörper. ***Forschungssatelliten*** dienen insbesondere der Erforschung des erdnahen Raums, wie atmosphärische und ionosphärische Untersuchungen, geodätische Vermessungen, Messung von Elektronenströ-

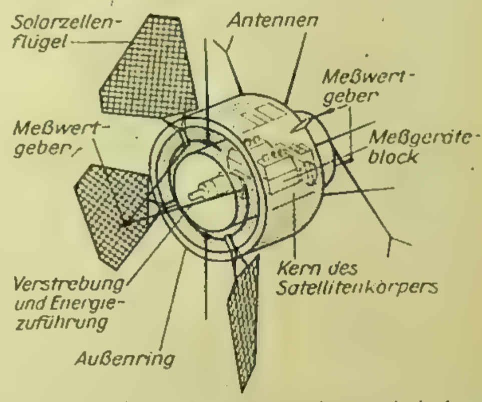


Abb. 16.5.3-3 Aufbauschema des sowjetischen Meßsatelliten „Proton 1"

men und -dichte, Untersuchung der Magnetosphäre, der Teilchenströme der Sonne usw. Durch stärkere Trägerraketen werden höhere Erdumlaufbahnen erreicht und können größere Nutzlasten eingebaut werden, z. B. „Proton 4", 17,3 t (UdSSR, 1968; Abb. 16.5.3-3). Deshalb vereinigen sich mehrere Länder zum Bau von Meß- und Forschungssatelliten und beteiligen sich an den umfangreichen Ausrüstungen, z. B. das Interkosmosprogramm der sozialistischen Länder. Die UdSSR hat 1962 das umfangreichste Forschungsprogramm mit der „Kosmos"-Serie begonnen (bisher mehr als 1 100 Meß- und Forschungssatelliten). Die Satelliten dienen auch der Erprobung von Teilsystemen zukünftiger bemannter Raumflugkörper, von Geräten der Flugführungstechnik und dem Testen von Einrichtungen zur praktischen Nutzanwendung der Raumfahrttechnik.

Mit *Biosatelliten* werden raumfahrtmedizinische und -biologische Probleme geklärt. In Behältnissen werden Lebewesen unter Weltraumbedin-

gungen beobachtet und die Einflüsse der Beschleunigung, der Schwerelosigkeit, der Strahlungsintensität erforscht. Hierzu gehören z. B. „Sputnik 2" mit der Hündin „Laika", „Kosmos 110" mit 2 Hunden, die nach 22 Tagen zur Erde zurückkehrten, „Biosat 3" mit Affen an Bord. Mit „Kosmos 782" wurde das erste Mal die Wirkung künstlich erzeugter Schwerkraft von 1 bis 0,6 g auf Schildkröten, Lurche, Pflanzen und Bakterien in 19,5 Tagen untersucht. An den 14 Versuchsanwendungen von „Kosmos 782" beteiligten sich die UdSSR, USA, ČSSR und Frankreich.

Nachrichtensatelliten ermöglichen das Übertragen von Fernschreiben, Ferngesprächen, Fernsehsendungen und Funkbildern über große Entfernungen, wobei verschiedene Informationen gleichzeitig und in großer Anzahl (z. B. bis 2 500 Ferngespräche) über einen Satelliten gesendet werden können (Tafel 96). Es bestehen zwischenstaatliche, transkontinentale und überseeische Satellitenverbindungen. Die UdSSR-Nachrichtensatelliten vom Typ „Molnija" (russ. Blitz) ermöglichen die Nachrichtenübertragung bis in die fernöstlichsten Gebiete der UdSSR sowie in die MVR und nach Kuba. Zum gesamten System gehören 3 umlaufende Molnija-Satelliten (Tafel 43) und viele „Orbita"-Stationen mit Parabolspiegelantennen von 12 m Durchmesser und 50 t Masse. In diesen und anderen *aktiven Nachrichtensatelliten* sind stromversorgte Empfangs-, Verstärkungs- und Wiedergabegeräte installiert; auch Zwischenspeicherungen von Informationen sind möglich, die vom Boden aus abgerufen werden können. Die anfänglich eingesetzten *passiven Nachrichtensatelliten* (z. B. Ballonsatellit „Echo", USA) reflektierten über Richtantennen nur die zugestrahlten Signale. Nachrichtensatelliten werden als Synchronsatelliten oder als stationäre Satelliten betrieben. Typenvertreter sind z. B. „*Syncom*" (*syn*chron[ous] und *com*munication = Verbindung), „*Early Bird*" (Frühaufsteher), „*Intelsat*" (*Int*ernational-*Tel*ecommunications Consortium *Sat*ellite), „*ATS*" (USA), die seit 1964 u. a. für das Übertragen der Olympischen Spiele eingesetzt werden (Tafel 43).

Wetterbeobachtungssatelliten übermitteln aus ihren überwiegend kreisähnlichen Bahnen (Bahnhöhen 900 bis 1 500 km) unterschiedlicher Neigung täglich mehrere Hundert Bilder von der Wolkenverteilung fast über der gesamten Erdoberfläche. Ihre Lebensdauer ist sehr lang (theoretisch bis 500 oder 1 000 Jahre), wird aber durch technische Störungen begrenzt. Durch das *APT-System* (automatic picture transmission = automatische Bildübertragung) der amerikanischen Wettersatelliten „*ESSA*" (environmental survey satellite = Umweltbeobachtungssatellit, Abb. 16.5.3-4) kann jede Wetter-

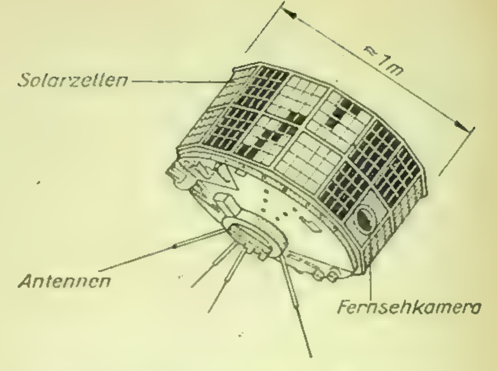


Abb. 16.5.3-4 Amerikanischer Wettersatellit vom Typ „ESSA"

warte der Erde mit Hilfe nachführbarer UKW-Spezialantennen die gesendeten Fernsehbilder empfangen. Dadurch wurden Wettervorhersage und Vorwarnmöglichkeiten in bezug auf Wirbelstürme u. a. wesentlich verbessert. Die Satelliten werden so stabilisiert (häufig durch Infrarotsteuerung, die auf die Wärmestrahlung der Erde anspricht), daß die Weitwinkel- oder Telekameras ständig auf die Erde gerichtet sind. Mehrere der sowjetischen Wettersatelliten „*Meteor*" bilden ein Beobachtungsnetz, das eine annähernd kontinuierliche globale Wetterüberwachung gewährleistet. Startzeiten und Bahnen werden so abgestimmt, daß ein Beobachtungsgebiet aller 6 h aufgenommen wird.

Andere Nutzanwendungssatelliten sind *Navigationssatelliten* für die Navigation im Luft- und Seeverkehr, *Erderkundungssatelliten* für wirtschaftsgeografische Beobachtungen und *Technologiesatelliten*, die neue technische oder technologische Verfahren (Werkstoffherstellung und -verhalten) unter Weltraumbedingungen erproben.

Planetensonden sind unbemannte Raumflugkörper zur Erforschung des planetennahen Raums, der Planetenoberfläche und des durchflogenen interplanetaren Raums. Je nach Aufgabe der Flugmission besteht die Ausrüstung aus Meßgeräten, Kameras, entsprechenden Geräten zur funktechnischen Übermittlung der Meßergebnisse und Fotos zur Erde, speziellem Landeteil, Rückstartteil u. a. *Mondsonden* (Tafel 68) lieferten zahlreiche Fotos von der Mondoberfläche aus verschiedenen Höhen („Luna", UdSSR; „Surveyor", USA) einschließlich Mondrückseite („Lunik 3, „Sonde 3", UdSSR) sowie Meßwerte über den mondnahen Raum und die Mondoberflächenverhältnisse. Mit mehreren Mondsonden gelang es, durch *automatische Landung* eines unbemannten Mondlandegeräts mit Rückstartteil (Tafel 68) Mondgestein zur Erde zu bringen und Meßgeräte abzusetzen. Unbemannte, von der Erde funkferngesteuerte *Mondfahrzeuge* wurden durch „Luna 17" (*Lu-*

nochod 1) und „Luna 21" (Lunochod 2) auf den Mond gebracht (Abb. 16.5.3-5), die auf der Mondoberfläche ≈ 1,0 bzw. 36 km zurücklegten, dabei die Mondoberfläche untersuchten, Telefotos und stereoskopische Panoramaaufnahmen zur Erde sendeten. *Mondsatelliten* sind auf einer geschlossenen Umlaufbahn um den Mond fliegende Raumflugkörper, mit denen topografische Aufnahmen, Strahlungs- und Magnetfelduntersuchungen und Mondkörperstrukturerforschungen vorgenommen werden (1. Mondsatellit „Luna 10", UdSSR, 1966). Der Planet Venus wurde durch die *Planetensonden* „Mariner 2" (USA, 1962), „Mariner 5" (1967) sowie von den sowjetischen Venussonden „Venera 5 und 6" hinsichtlich Temperaturverhältnisse, Zusammensetzung der Venusatmosphäre u. a. erforscht. „Venus 4" (UdSSR, 1967) übermittelte durch ein abgetrenntes Landeteil, das an einem Fallschirn zur Venusoberfläche schwebte, Meßwerte aus der Venusatmosphäre. Landekörper von „Venus 7" (1970) sendete von der Venusoberfläche erstmals Meßwerte. Mit „Venus 9 und 10" (UdSSR, 1975) gelang es, den ersten Venussatelliten einzurichten und erste Panoramafotos von der Venusoberfläche zu erhalten. „Pioneer-Venus II" (USA, 1978) brachte erstmals 4 kleine Meßsonden zur Venus.

Die amerikanischen *Marssonden* „Mariner 4" (1964, Abb. 16.5.3-6), „Mariner 6, 7 und 9" verschafften detaillierte Angaben über Marsoberfläche, -atmosphäre und Temperaturverhältnisse. Die sowjetischen Sonden „Mars 2" und „Mars 3" setzten 1971 erstmalig Landekapseln auf der Marsoberfläche ab. Die Marssonden „Viking 1 und 2", USA, haben Landeapparate auf dem Mars abgesetzt und biologische Untersuchungen der Marsoberfläche auf lebende Mikroorganismen durchgeführt. „Mariner 10" stellte am Merkur ein schwaches Magnetfeld und eine dünne Atmosphäre fest. Die amerikanischen Sonden „Pioneer 10" (1973) und „11" (1974) übertrugen Farbfernsehaufnahmen vom Jupiter und dessen Monden. „Pioneer 11" passierte im

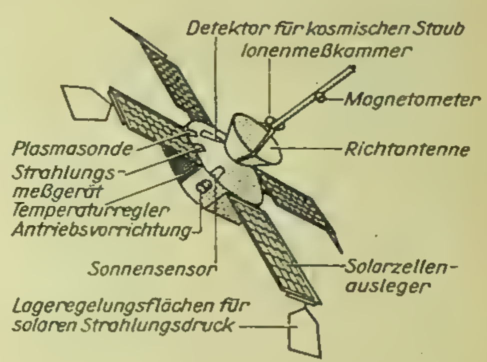


Abb. 16.5.3-6 Aufbauschema der amerikanischen Marssonde „Mariner 4"

September 1979 den Planeten Saturn auf einer Flugbahn zwischen Planet und Ringsystem und flog in 20000 km Abstand am Saturnmond Titan vorbei. Zur weiteren Erforschung der Riesenplaneten wurden in den USA 1977 die Raumsonden „Voyager 2 und 1" gestartet, wobei der Planet Neptun erst 1989 erreicht werden wird.

Anfang 1979 funkte „Voyager 1" die ersten Farbbilder von der Jupiteroberfläche und von den inneren 4 Jupitermonden. Mitte 1979 gelangten von „Voyager 2" Fotos vom Jupiter, seinem Ring und von verschiedenen seiner Monde zur Erde.

Bemannte Raumflugkörper. Zum Schutz des menschlichen Lebens und zur Gewährleistung der Arbeitsfähigkeit im Weltraum sind zahlreiche Erfordernisse zu realisieren (Tafel 96): 1. ausreichender Platz, i. allg. werden gegenwärtig bemannte Raumflugkörper auf 2 bis 3 Einheiten aufgebaut (*Geräte-* und *Antriebseinheit*, *Kommando-* und *Rückkehreinheit*, *Orbitaleinheit*), 2. lebenserhaltende Kabinenatmosphäre bezüg-

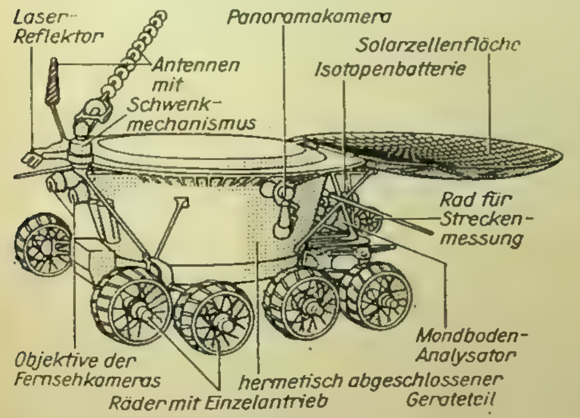


Abb. 16.5.3-5 Sowjetisches funkferngesteuertes Mondfahrzeug vom Typ „Lunochod"

lich Luftzusammensetzung, Druck, Temperatur, Feuchtigkeit, 3. automatisches und/oder mit Hand zu betätigendes Flugführungssystem für alle Steuerungsoperationen, 4. Hitzeschutz für Eintauchkörper und funktionszuverlässiges Fallschirmsystem, 5. sicherer Schutz vor kosmischer Strahlung, 6. ausreichende Energiequellen, 7. Nahrungsmittel für die Besatzung, 8. automatisches Überwachungssystem der körperlichen Funktionen einschließlich von Geräten zur Belastung der Körpermuskeln der Besatzung bei längeren Aufenthalten in der Schwerelosigkeit, 9. Funk-, Fernseh- und Magnetbandgeräte zur Verständigung, 10. *Raumanzüge*, die Atmung, Temperaturregelung, Bewegungsfreiheit, völlige Dichtheit gewährleisten müssen. Diese werden beim Start und bei der Rückkehr angelegt, in Raumstationen reichen Bordanzüge aus. Auf anderen Planeten sind Raumanzüge mit einem völlig autonomen Versorgungssystem erforderlich.

Der erste bemannte Raumflugkörper war „Wostok 1" mit *J. A. Gagarin* (12. 4. 1961). Weiterentwicklungen der bemannten Raumflugkörper ermöglichten ab 1965 Rendezvous- und Kopplungsmanöver, Ausstiege von Besatzungsmitgliedern (*Leonow*, 1965), Dauerflüge („Sojus 9", ≈ 425 h, 1970), Flüge um den Mond („Apollo 8 und 10", 1968/69) und Landungen auf dem Mond („Apollo 11", 21. 7. 1969 erster Mensch auf dem Mond *N. Armstrong*, „Apollo 12, 14 bis 17", 1969/72). Dazu verblieb die Geräte- und Antriebseinheit mit Kommandoeinheit auf einer Mondumlaufbahn, und zur Mondlandung stieg eine mitgeführte Mondlandefähre („*lunar modul*" = Mondeinheit) mit autonomem Versorgungssystem ab (Tafel 68). Während der Aufenthalte auf dem Mond wurden wissenschaftliche Geräte installiert, Gesteinsproben von unterschiedlichen Landeorten eingesammelt und Erkundungsfahrten über ≈25 km mit dem Mondfahrzeug *lunar roving vehicle* unternommen.

Raumstationen (*Außenstationen*) sind Erdsatelliten, die sehr lange Zeit die Erde umlaufen und der Erforschung der Erde und des erdnahen Raums sowie meteorologischen, astronomischen und physikalischen Forschungsaufgaben dienen. Erste Raumstation 1971 durch Kopplung von „Sojus 11" mit „Saljut 1" (Tafel 69) für 24 Tage. Das Programm wurde mit „Saljut 2 bis 4" bei mehrfachem Besatzungswechsel fortgesetzt (Abb. 16.5.3-7). Eine neue Etappe für Erdaußenstationen wurde mit „Saljut 6" (UdSSR, September 1977; Tafel 96) eingeleitet. Erstmals mit zwei Kopplungsvorrichtungen ausgestattet, konnten 3 Raumflugkörper zu einem Orbitalkomplex zusammengekoppelt werden. Einweg-Raumtransporter vom Typ „Progress" versorgen „Saljut 6" mit Treibstoff, lebenswichtigen Gütern für die Besatzung sowie mit neuen Forschungsgeräten. Dadurch war es möglich, daß die zweite Stammbesatzung, Wladimir *Kowaljonow* und Alexander *Iwantschenkow*, 137,2 Tage in „Saljut 6" arbeiten konnten. Die USA beschickten die Raumstation „*Skylab*" mit Apollo-Zubringerraumflugkörpern dreimal für 28, 59 und 83 Tage (1973/74). Die erste Kopplung von bemannten Raumflugkörpern verschiedener Länder erfolgte am 17. 7. 1975 (Tafel 69) während des Raumfahrtunternehmens *SATP* (*Sojus-Apollo-Test-Projekt*). Mit der Angleichung technischer Konzeptionen und der Standardisierung von Baugruppen und Ausrüstungen der Raumfahrzeuge werden Gemein-

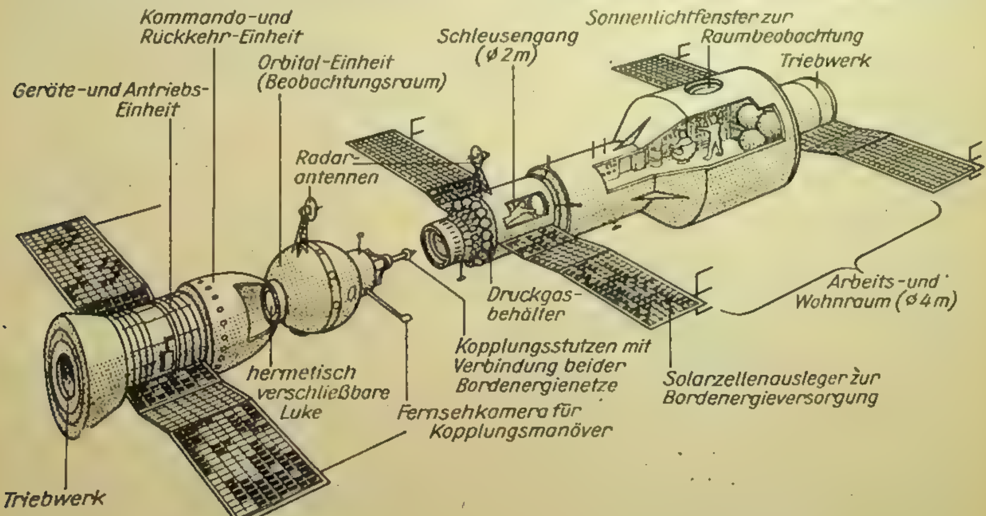


Abb. 16.5.3-7 Bemannte Raumstation „Saljut" (rechts, L = 20 m, V = 100 m³, m = 19 t) mit Zubringer-Raumfahrzeug „Sojus" (links, L = 9 m, V = 9 m³, m = 6,5 t) kurz vor der Kopplung

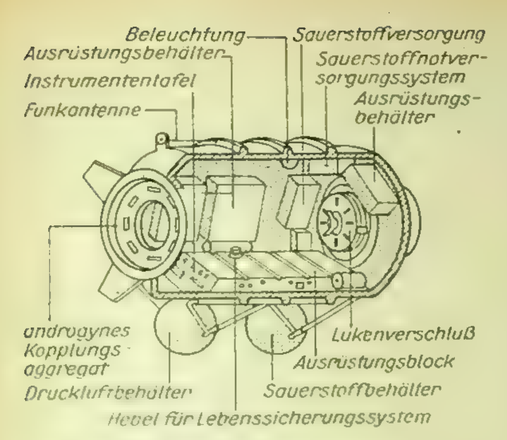


Abb. 16.5.3-8 Druckschleuse



Abb. 16.5.4-1 Schema eines Raumtransporters

schaftsunternehmen gefördert, die Kosten reduziert und Rettungsaktionen bei Havarien im Kosmos möglich. Für die Kopplung war der Bau eines *Kopplungsstutzens*, des *Adapters* (engl., Anpasser), notwendig, der mit einer Masse von 1,9 t, mit autonomen Versorgungseinrichtungen und einer *Druckschleuse* als Mini-Raumflugkörper angesehen werden kann. Aufgrund der unterschiedlichen Kabinenatmosphären in dem Sojus- bzw. Apollo-Raumflugkörper mußten die überwechselnden Besatzungsmitglieder für 20 min Anpassungszeit in dem Adapter verweilen. Für 44 h bildeten die gekoppelten Raumflugkörper eine Raumstation, die neben der erfolgreichen Testung des Kopplungsaggregats (Abb. 16.5.3-8) eine Reihe wissenschaftlicher Aufgaben löste.

16.5.4. Weitere Probleme der Raumfahrt

Die nächste Entwicklungsetappe ist die Montage großer wissenschaftlicher *Orbitalstationen* und *Raumbasen* in Erdumlaufbahnen. Durch ihre Größe und Form ist ein unmittelbarer Start von der Erde aus technisch nicht möglich. Vorgefertigte Teile der Station müssen deshalb einzeln auf die Umlaufbahn gebracht und anschließend miteinander gekoppelt werden. Dies kann automatisch oder, entsprechend heutiger Vorstellungen, durch einsitzige Raumflugkörper mit Manipulatoren geschehen. Diese Orbitalstationen müssen aufgrund ihrer Größe in Sektionen aufgegliedert sein und durch eine aus mehreren Schichten bestehende Außenhülle vor kleinen Meteoriten und solaren Strahlungen geschützt werden. Um den Menschen einen längeren Aufenthalt zu ermöglichen, ist das Problem der Erzeugung einer künstlichen Schwerkraft zu lösen (Vorversuche mit Kosmos 782). Nahrung, Sauerstoff usw. müssen in der Station selbst erzeugt werden, z. T. aus Rückständen (Abfällen), aber auch aus Produkten des menschlichen Stoffwechselkreislaufs. Zur Senkung der hohen Kosten für alle Raumfahrtunternehmen, besonders aber für den regelmäßigen Zubringerverkehr zu den Raumstationen, werden *Raumtransporter* entwickelt, die aus einem Trägersystem und dem eigentlichen Zubringerraumflugkörper bestehen. Die wiederverwendbare Startrakete bringt das Zubringerfahrzeug bis zu einer bestimmten Bahnhöhe, von der aus dieses mit Hilfe eigener Triebwerke bis in die vorgesehene Umlaufbahn startet (400 bis 800 km). Die sowjetische Version sieht den Start zweier bemannter *Nur-Deltaflügler* vor, die im Huckepack starten. Sowohl die Träger- als auch die Umlaufstufe sollen im Gleitflug zur Erde zurückkehren. Das Raumprojekt der UdSSR nennt sich *Kosmoljot*. Der amerikanische „space-shuttle" (Raumpendler, Tafel 69) hat 2 Feststoffraketen als Starthilfen, um ihn auf Bahnhöhe zu bringen. Der *Orbiter*, die Umlaufeinheit, ist ein steuerbarer Flugkörper mit Tragflächen und einem Flüssigwasserstoff-Flüssigsauerstoff-Raketenantrieb und einem abwerfbaren Außentreibstoffbehälter. Der Orbiter hat Laderaumabmessungen von 18,3 m Länge und einen Durchmesser von 4,6 m. Nur der Orbiter ist wiederverwendbar. Vorgesehen sind Vertikalstart und horizontale Landung (Abb. 16.5.4-1).

17. Polygrafische Technik

Der Begriff Polygrafische Technik faßt die Technologie der Polygrafie und die eingesetzten Maschinen und Geräte zusammen. Die Hauptaufgabe des Industriezweigs Polygrafie ist die Informationsverbreitung. Polygrafische Erzeugnisse sind besondere, blattförmige Informationsträger. Durch die dem Menschen sehr gut angepaßte Informationsentnahme hat das polygrafische Erzeugnis große Bedeutung. Aufgaben werden dabei auf dem Gebiet der allgemeinen Information, der politisch-ideologischen Agitation, der Wissensspeicherung und Bildung sowie der Freizeitgestaltung erfüllt. Typische Erzeugnisse der Polygrafie sind Zeitungen, Zeitschriften, Bücher, Werbedrucksachen u. a. in der gesellschaftlichen und privaten Sphäre benötigten Drucksachen.

Das technologische Grundprinzip bei der Herstellung polygrafischer Erzeugnisse, die partielle Übertragung einer Farbschicht auf einen Träger, die zu einem optischen Kontrast führt, macht das Verfahren sehr effektiv und das Erzeugnis gegenüber anderen Informationsträgern außerordentlich preisgünstig. Die Informationsübertragung durch Farbe wird in Druckmaschinen vorgenommen, die in der Regel mittels Druck einen entsprechenden Kontakt zwischen dem Bedruckstoff (meist Papier) und der Farbe herstellen. Den größten Teil der polygrafischen Erzeugnisse produzieren 3 Hauptdruckverfahren, der *Flachdruck*, *Hochdruck* und *Tiefdruck*. Daneben haben Bedeutung der *Durchdruck* (Siebdruck) und *Elektrodruck* (Xerografie).

Der Gesamtprozeß der Polygrafie setzt sich aus den 3 Prozessen *Druckformenherstellung*, *Druck* und *Buchbinderei* zusammen.

17.1. Druckformenherstellung

Ausgehend von einer Vorlage wird in der Druckformenherstellung in der Regel über Zwischenträger die für den Druckprozeß notwendige Druckform erzeugt. Druckformen sind besondere Informationsträger, deren Informationen durch partielle Farbweitergabe beliebig wiederholend übertragen werden können. Zu unterscheiden ist zwischen der *Bild-* und *Schriftformenherstellung* (*Setztechnik*).

Die gesamte Druckformenherstellung setzt sich aus den Teilprozessen Informationszwischenträgerherstellung, Druckbildmontage und Druckformrohlingsbearbeitung zusammen. Die *Informationszwischenträgerherstellung* hat die Aufgabe, unmittelbar von der Vorlage Träger zu erzeugen, die eine verfahrenstechnische Bearbeitung der Information gestatten und eine Weitergabe an die Druckformrohlinge ermöglichen. In der *Druckbildmontage* erhalten die Druckbildteile ihre richtige Stellung zueinander. Schließlich wird während der *Bearbeitung des Druckformrohlings* die Druckform erzeugt und die Oberfläche so gestaltet, daß eine partielle Farbannahme und -abgabe möglich wird.

17.1.1. Fotografische Informationszwischenträgerherstellung

Aufgabengebiete und Einrichtungen. Die meisten Informationszwischenträger werden auf fotografischem Wege hergestellt. Sie sind je nach Bedarf transparente Positive oder Negative. Durch Kopie kann die Information von ihnen auf die Druckformrohlinge übertragen werden. Für die Herstellung der Informationszwischenträger wird die allgemein übliche Silberfotografie, auch *Graukontrastfotografie* genannt, eingesetzt. Die dabei notwendigen großformatigen Reproduktionskameras sind mit elektronischen Einrichtungen zur Qualitäts- und Leistungssteigerung ausgerüstet. Dadurch ist es möglich, die Belichtungszeiten zur Herstellung der Informationszwischenträger in Abhängigkeit von der Vorlage zu ermitteln und einzuhalten. Eine besondere Bauweise sind die *Zweiraumkameras* (Abb. 17.1.1-1). Sie ermöglichen durch Unterbringung des hinteren Kamerateils in einem Dunkelraum eine effektive Arbeitsweise. Diese Geräte sind mit elektronisch gesteuerten Zusatzeinrichtungen versehen, die eine Fernbedienung des sich im Hellraum befindlichen Kamerateils gestatten. Reproduktionskameras haben Zusatzeinrichtungen für die Größenänderung und die

Seitenumkehr des Bildes sowie für die Rasterung und die Herstellung von Farbauszügen.
Die notwendige Entwicklung und Fixierung wird in *Tankentwicklungsgeräten* für blattförmiges Material und in *Rollenentwicklungsgeräten* für bahnförmiges Filmmaterial vorgenommen. Diese Geräte arbeiten nach einem vorgegebenen Programm und verfügen über eine automatische Regenerierung der eingesetzten Bäder.
Für die fotografischen Aufnahmen werden vorwiegend spezielle *Reproduktionsfilme* verwendet. Ebenso sind die Chemikalien für die Entwicklung, Fixierung, Abschwächung, Verstärkung u. a. Spezialanfertigungen.

Aufnahmearten. Aufgrund der Besonderheiten der herzustellenden Druckformen werden von vornherein Halbton- und Strichaufnahmen unterschieden. Die meisten Druckformen sind nicht in der Lage, die Farbübertragung partiell in unterschiedlichen Mengen vorzunehmen. Solche Druckformen unterscheiden lediglich zwischen Übertragung und Nichtübertragung. Einen Übergang zwischen diesen Extremen gibt es nicht. Entsprechend müssen die Informationszwischenträger gestaltet sein. Sie dürfen nur eindeutig geschwärzte neben eindeutig transparenten Stellen aufweisen (Strich- oder Rasterbilder).

Halbtonaufnahmen zeigen alle Tonwerte vom Weiß bis zum Schwarz in abgestuften Grautönen. Sie können als Kopiervorlagen nur für solche Druckformen dienen, die eine verschieden große Farbmenge übertragen können, z. B. Tiefdruck oder Lichtdruck. In anderen Fällen müssen sie durch Rasterung aufbereitet werden.

Strichbildaufnahmen zeigen nur gedeckte oder ungedeckte Partien. Von ihnen können ohne Schwierigkeiten sofort Druckformen hergestellt werden. Das dabei eingesetzte Fotomaterial muß hart arbeitend sein.

Rasteraufnahmen. Mit Hilfe der Rasterung wird es erst möglich, im Flach-, Hoch- und Durchdruck Halbtonbilder wiederzugeben. Die unterschiedlichen Grautöne, durch unterschiedliche Schwärzung hervorgerufen, werden durch die Rasterung in größere und kleinere Punkte zerlegt. Die Größenvariation der Punkte innerhalb eines Rasterbildes ersetzt die unterschiedliche Schwärzung eines Halbtones. So werden Halbtöne vorgetäuscht, da das Auge die einzelnen Punkte nicht mehr wahrnehmen kann. Die Rasterung erfolgt durch ein optisches Element während der fotografischen Aufnahme oder Kopie. Dabei werden 2 Methoden angewendet: die Kontakt- und die Distanzrasterung. Die Kontaktrasterung erfolgt durch unmittelbares Auflegen eines Kontaktrasters auf den fotografischen Film, während der Distanzraster einen Abstand zum Film erforderlich macht. *Distanzraster* sind Glas-Kreuzlinien-Raster (Abb. 17.1.1-2). Sie bestehen aus 2 Spiegelglasscheiben, deren eingravierte oder geätzte Linien mit schwarzer Farbe gefüllt sind und sich unter 90° kreuzen. Durch die Kern- und Halbschattenwirkung dieses Gitters in Verbindung mit der Arbeitsweise des Films entsteht das Rasterbild. Der *Kontaktraster* ist ein Film-Punkt-Raster. Die Punkte besitzen im Kern eine maximale Schwärzung, die nach den Rändern abfällt. Im Schnitt

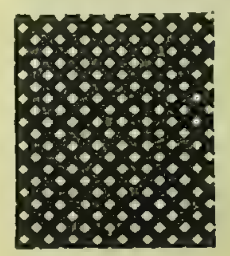


Abb. 17.1.1-2 Ausschnitt aus einem Kreuzlinienraster (stark vergrößert)

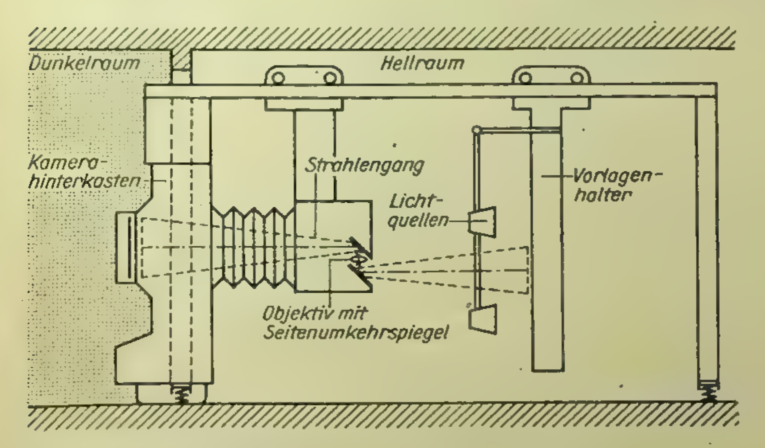


Abb. 17.1.1-1 Zweiraum-Reproduktionskamera

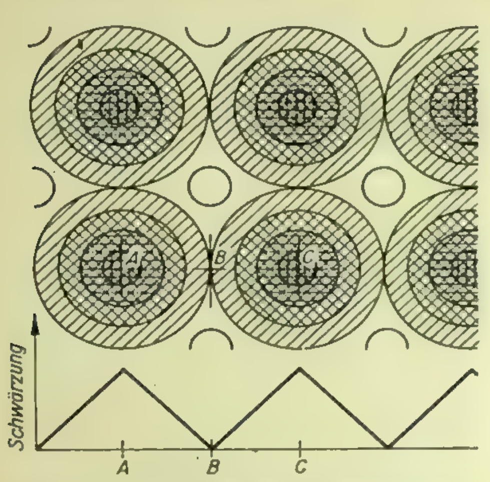


Abb. 17.1.1-3 Schema eines Kontaktrasters (oben, Draufsicht) und Schwärzungsverlauf innerhalb der Punkte (unten)

ergibt sich ein solcher Raster als ein auf- und abschwellendes Schwärzungsgebiet (Abb. 17.1.1-3). Dadurch entsteht bei der Kontaktrasterung im Kopiergerät in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Schwärzung des darüberliegenden Informationszwischenträgers ein definierter Punkt. Eine weniger geschwärzte Stelle im Informationszwischenträger erzeugt einen großen und eine mehr geschwärzte Stelle einen kleinen Punktdurchmesser. Das hergestellte Rasternegativ kann unmittelbar oder nach einer Umwandlung in ein Positiv als Kopiervorlage für die Druckform benutzt werden. Kontaktraster können auch bei der Aufnahme in der Kamera eingesetzt werden.

Die Raster werden nach der Punkt- bzw. Linienzahl je Zentimeter bezeichnet, z. B. als 24er, 48er, 54er, 60er oder 70er Raster. 24er bis 32er Raster werden für Tageszeitungen, 48er bis 54er für einfarbige Reproduktionen und 60er bis 70er Raster für mehrfarbige Reproduktionen verwendet.

Farbauszüge. Mehrfarbendrucke erfordern allgemein den Einsatz von 3 oder 4 Druckformen. Dabei werden die standardisierten Druckfarben Zyan (Blaugrün), Magenta (Purpur), Gelb und in der Regel Schwarz übereinander gedruckt. Die Herstellung der notwendigen Druckformen erfordert das „Herausziehen" der Farben aus der farbigen Vorlage. Das ist durch den Einsatz von *Farbfilterung* möglich. Solche Filter lassen das Licht ihrer eigenen Farbe passieren und absorbieren das übrige. Das gesamte sichtbare Licht läßt sich in 3 Farbenbereiche aufspalten: Blau, Grün und Rot. Durch die Arbeitsweise der Filter wird jeweils ein Spektralbereich hindurchgelassen, während 2 Bereiche absorbiert werden. Je 2 Bereiche ergeben bei ihrer additiven Mischung die Druckfarben Zyan (Blau + Grün), Magenta (Blau + Rot) oder Gelb (Grün + Rot). So entstehen die Negative der entsprechenden Farben. Der Rotfilter erzeugt den Zyanauszug, der Grünfilter den Magentaauszug und der Blaufilter den Gelbauszug. Der Schwarzauszug wird entweder ohne Filter, mit Gelbfilter oder während 3 Aufnahmeabschnitten mit allen Filtern vorgenommen.

Die hergestellten Auszüge sind fehlerhaft. Die Ursachen liegen in den optischen Fehlern der Filter und der Druckfarben sowie in der Arbeitsweise des Filmmaterials. Dadurch sind *Korrekturverfahren* notwendig. Mit speziellen fotografisch hergestellten *Masken* lassen sich Mängel ausgleichen. Die Filmindustrie hat zur Anwendung in der Reproduktionsfotografie Maskenfilme entwickelt. Ein verbleibender Rest an Fehlern muß manuell in der Retusche beseitigt werden.

17.1.2. Elektronisch gesteuerte Druckformen- und Kopiervorlagenherstellung

Elektronische Geräte bestehen neben dem elektronischen Teil im wesentlichen aus einem Aufnahmeteil und einem Wiedergabeteil

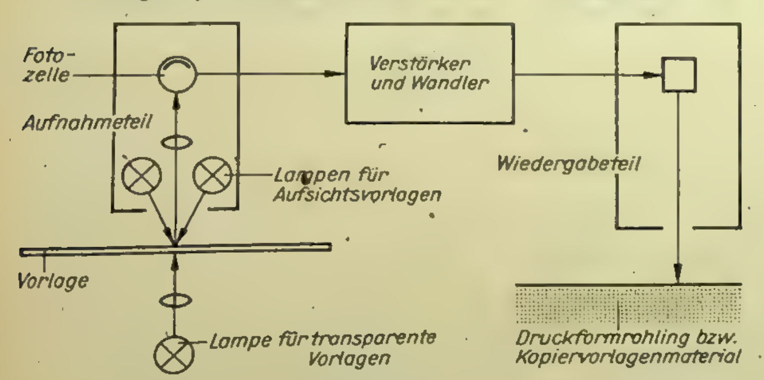


Abb. 17.1.2-1 Grundschema elektronischer Geräte der Druckformenherstellung (Scanner)

(Abb. 17.1.2-1). Das *Aufnahmeteil* tastet lichtelektrisch die Vorlage zeilen- und punktweise ab. Am *Wiedergabeteil* erfolgt die Aufzeichnung. Möglichkeiten zur Rasterung sind vorhanden. Dabei werden die informationstragenden Impulse des Bildes von einer Rasterfrequenz überlagert, die in einem Rastergenerator oder optisch durch sich bewegende Rasterscheiben erzeugt wird. Der Signalstrom wird dadurch regelmäßig zerteilt, was zu einer Rasterung am Wiedergabeteil führt. Mehrere Rasterweiten sind möglich. Die Arbeitsweise des Wiedergabeteils kann verschieden sein.

Fotografische Wiedergabe. Die Aufzeichnung erfolgt durch steuerbare Lichtquellen, die hinreichend trägheitslos arbeiten und einen Film belichten. Die Belichtungszeiten für einen Punkt liegen unter einer Millisekunde. Der dabei eintretende Kurzzeiteffekt, das starke Absinken der Filmempfindlichkeit, erfordert hohe Belichtungsenergien. Daher werden oft Laser als Lichtquelle verwendet, die die benötigte Energie und Konturenschärfe garantieren.

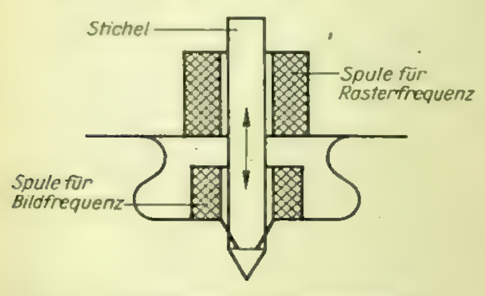


Abb. 17.1.2-2 Stichel mit Steuerelementen in einem elektronischen Graviergerät

Mechanische Wiedergabe (Gravieren). Die Aufzeichnung wird von einem Gravierstichel vorgenommen, dessen Eindringtiefe durch vom Aufnahmeteil kommende Signale gesteuert wird. Durch die Stichelform werden unterschiedliche Oberflächenpartien abgetragen bzw. verschiedene Tiefen erzeugt (Abb. 17.1.2-2). So können Hochdruck- und Tiefdruckformen hergestellt werden. Es sind Strich- und Rastergravuren möglich. Bei Rastergravuren schwingt der Stichel entsprechend der aufgebrachten Rasterfrequenz.

Zur Herstellung von Kopiervorlagen nach dem Gravierverfahren werden transparente Folien mit einer lichtundurchlässigen Schicht verwendet. Der Stichel trägt partiell die lichtundurchlässige Schicht ab und erzeugt so kopierfähige Informationszwischenträger. Sie werden vor allem bei der Herstellung von Flachdruckformen eingesetzt.

Elektronisch gesteuerte Farbauszüge und Korrekturen. Zur Herstellung von Farbauszügen wird das Licht bei der punktweisen Bildaufnahme durch Lichtfilter oder Prismen zerlegt. Spiegel wählen die entsprechenden Spektralteile aus. Durch das parallele Verarbeiten aller 3 Spektralanteile und durch einprogrammierte Werte kann eine Farbkorrektur sofort elektronisch vorgenommen werden. Entsprechend der gleichzeitigen Bearbeitung von 3 Spektralfarben (1 Auszug-, 2 Korrekturkanäle) oder 2 Spektralfarben (1 Auszug-, 1 Korrekturkanal) werden Drei- oder Zweikanalgeräte eingesetzt. Die Farbauszüge können nacheinander oder gleichzeitig hergestellt werden.

17.1.3. Setztechnik

Das Manuskript wird unter Verwendung von Schriftzeichen, die im optischen Bild der Druckqualität entsprechen, in Hochdruckformen oder Informationszwischenträger (Kopiervorlagen) umgesetzt. Die *Schrift* steht in verschiedenen Schriftgraden (Größen) und Ausführungsformen, z. B. gewöhnliche, schmale und Auszeichnungsschriften, zur Verfügung. Letztere dienen zur Hervorhebung von Textteilen und sind halbfett, fett oder kursiv (schrägstehend).

Der *Setzvorgang* umfaßt folgende Teile:

1. Zeilenbildung (Aneinanderreihen der Zeichen),
2. Ausschließen (Zeile in geforderte Form bringen),
3. Korrektur
4. Umbruch (Seitenbildung, Anordnen der Zeilen auf Seiten).

Beim Ausschließen der Zeilen wird deren optisches Bild auf eine vorgegebene, konstante Länge gebracht. Das geschieht durch die nach optischen Gesichtspunkten gleichmäßige Aufteilung des verbleibenden Zeilenrestes auf die Wortzwischenräume bzw. es wird eine nicht mehr vollständig in die Zeile hineingehende Silbe durch Verringern der Zwischenräume untergebracht.

Bleisatz. ***Handsatz.*** Baukastenartig werden vorgefertigte Teile manuell zu einer Hochdruckform zusammengefügt. Das dabei verwendete Material besteht hauptsächlich aus Drucktypen (Lettern) und Blindmaterial. Alle Maße entsprechen dem *typografischen System*. Die kleinste Einheit ist der typografische Punkt (p) mit 0,376 mm. Die *Schrifthöhe* ist mit $62^2/3$ p = 23,567 mm und das Blindmaterial mit 54 p = 20,307 mm bzw. $50^2/3$ p = 19,053 mm standardisiert.

Die Lettern besitzen zur Schriftkennzeichnung und besseren Lageerkennung beim Setzen Signaturen (Abb. 17.1.3-1). Das gesamte verwendete Material ist übersichtlich in Regalen und gefächerten Kästen geordnet. Die Schrift befindet sich in standardisierten Schriftkästen. Nach dem Druckvorgang werden die Druckformen wieder auseinandergenommen und das Material ein-

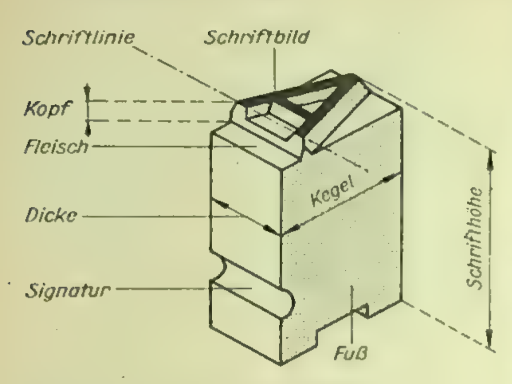


Abb. 17.1.3-1 Drucktype (Letter)

geordnet. So steht es zur wiederholten Verwendung bereit.

Heute werden nur noch Arbeiten mit geringem Textumfang, z. B. Überschriften u. a. Einzelzeilen, im Handsatz hergestellt. Außerdem werden im Handsatz der Maschinensatz und Bildteile zu Hochdruckformen zusammengestellt.

Maschinensatz. Mittels einer Blei-Antimon-Zinn-Legierung werden *Matrizen* (Buchstabengießformen) als Einzelbuchstaben oder in vollständigen Zeilen ausgegossen und so Hochdruckformen hergestellt. Im Gegensatz zum Handsatz liegt das Material stets als Neuguß vor. Die Matrizen werden durch Tastenanschlag oder über Lochstreifen ausgelöst bzw. gesteuert.

Zeilensetz-und-gießmaschinen fügen freibewegliche Matrizen (Abb. 17.1.3-2) zu Zeilen, die als Ganzes abgegossen werden, zusammen (Abb. 17.1.3-3). Die Matrizen werden danach wieder in das Magazin zurückgeführt. Das Ausschließen erfolgt durch Auseinandertreiben der Matrizen mittels Keile, die in den Wortzwischenräumen eingefügt sind. Die Tastatur zur Matrizenauslösung befindet sich direkt an der Maschine. Eine Steuerung über Lochband ist ebenfalls möglich (Schnellsetzmaschinen).

Einzelbuchstabensetz-und-gießmaschinen bestehen aus dem Taster zur Herstellung des Lochstreifens und der Gießmaschine. Durch den Lochstreifen wird in der Gießmaschine ein Matrizenrahmen in 2 Koordinaten so gesteuert, daß jeweils der entsprechende Buchstabe abgegossen wird. Das Ausschließen erfolgt durch einen Rechenvorgang während des Setzens und einer Speicherung der Werte auf dem Lochstreifen. Die gegossenen Buchstaben werden zu Zeilen und Blöcken in der Gießmaschine zusammengestellt.

Lichtsatz. Lichtsetzmaschinen stellen *Informationszwischenträger* (*Kopiervorlagen*) her. Auf fotografischem Wege wird das Schriftbild durch Belichtung und Entwicklung erzeugt. Es kann beliebig als Durchsichts-, Aufsichts-, positives oder negatives Bild entstehen. Mit Ausnahme der für Einzelzeilen und kurze Texte eingesetzten Handlichtsetzgeräte arbeiten alle Lichtsetzmaschinen mit Loch- oder Magnetband oder

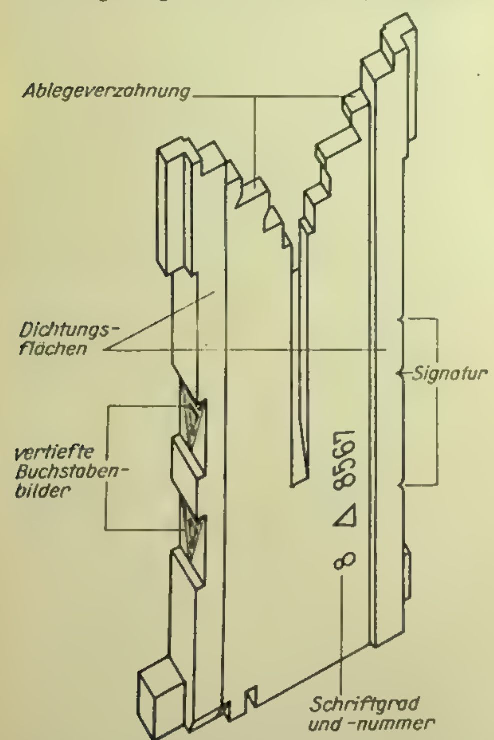


Abb. 17.1.3-2 Matrize einer Zeilensetz-und-gießmaschine mit Normal- und Auszeichnungsschrift

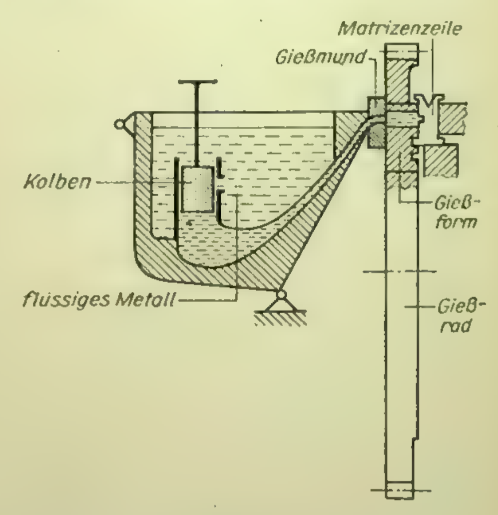


Abb. 17.1.3-3 Gießkessel, Gießform und Matrizenteile einer Zeilensetz-und-gießmaschine

werden direkt von EDV-Anlagen gesteuert. *Perforatoren (Taster)* mit Klartextschreiber ermöglichen die Herstellung von Lochbändern und Korrekturbelegen. Zur Leistungssteigerung am Perforator werden die Lochbänder i. allg. ohne Zeilenteilung getastet. In EDV-Anlagen wird später die Zeilenbildung einschließlich der *Silbentrennung nach Programm* vorgenommen. Auch eine typografische Bearbeitung und der Umbruch (Stellung der Wortgruppen und Blöcke im vorgesehenen Raum) ist möglich. Textkorrekturen können durch Bandkorrekturen (*Bandverschmelzung*) oder durch manuelle Montage am Informationszwischenträger vorgenommen werden. Die Leistungsfähigkeit der Lichtsetzmaschinen liegt bei einigen Millionen Zeichen pro Stunde. Der Lichtsatz wird in naher Zukunft den Bleisatz ablösen.

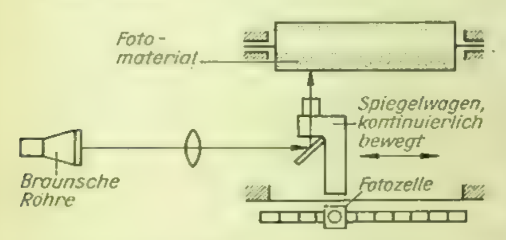


Abb. 17.1.3-4 Schriftaufzeichnung in einer Lichtsetzmaschine mit Katodenstrahlröhre

Die Funktionsprinzipe der Lichtsetzmaschinen sind sehr unterschiedlich. Zur Auswahl, Lagefixierung und Wiedergabe der Buchstabenbilder sind optische, mechanische und elektronische Baugruppen eingesetzt. Die die optischen Bildzeichen tragenden Elemente können freibewegliche Teile, als rotierende Scheiben ausgebildet oder feststehend sein. Die optischen Vorlagenbilder der Schriftzeichen können unmittelbar projiziert oder zeilenweise abgetastet und in Punkte aufgelöst werden, danach synchron durch punktweisen Aufbau auf dem Fotomaterial wiedergegeben werden. Andere Lichtsetzmaschinen enthalten die Schriftzeichen in kodierter Form in Magnetkernspeichern. Sie werden beim Setzen abgerufen und über eine Katodenstrahlröhre dargestellt (Abb. 17.1.3-4).

Schreibsatz. Schreibsetzmaschinen stellen Aufsichtsvorlagen her, die fotografisch in der Druckformenherstellung weiterverarbeitet werden können. Es sind spezielle Schreibmaschinen, mit denen die Buchstaben entsprechend ihres optischen Bildes in unterschiedlicher Breite wiedergegeben werden.

Durch die mögliche Variation der Wortzwischenräume ist das Ausschließen der Zeilen auf gleiche Längen gegeben. Dabei muß der Text zweimal geschrieben werden. Bei der Erstschrift müssen die Zeilen in einem vorgegebenen Ausschließbereich enden. Schreibsetzmaschinen verfügen über mehrere Schriften.

17.1.4. Druckbildmontage

Hierbei wird ein lagegenaues Anordnen der einzelnen Druckbildteile entsprechend dem Druckbogen erreicht. Die Teile können Seiten eines Druckerzeugnisses oder Einzelnutzen (Zusammenstellung mehrerer Druckerzeugnisse auf einem Bogen) sein. Bei *Ganzdruckformen* (Flach-, Tief- und Durchdruck ausschließlich, Hochdruck teilweise) werden Informationszwischenträger montiert (Filmmontage). Bei den *Teildruckformen* (Hochdruck) werden die Druckformteile durch „Ausschießen" in die richtige Lage zueinander gebracht. Ausgangspunkt ist stets das Format des zu bedruckenden Bogens mit einer Grundeinteilung. Die *Filmmontage* wird durch Aufkleben der Filme auf eine transparente, dimensionsstabile Montageunterlage vorgenommen. Das Einpassen erfolgt unter visueller Kontrolle mit dem Einpaßrohr unter Vermeidung von Parallaxenfehlern nach Paßkreuzen und Bildkonturen. Besondere Bedeutung hat diese Arbeit hinsichtlich der Paßgenauigkeit von Mehrfarbendrucken. Ganzformen lassen sich nach ihrer Herstellung nicht mehr verändern. Hohe Genauigkeiten werden durch *Paßstiftsysteme* in der Montage erreicht. Ihre durchgängige Anwendung von der Informationszwischenträgerherstellung bis zur Informationsübertragung auf den Druckformrohling erhöht die Qualität erheblich.

17.1.5. Bearbeitung des Druckformrohlings

Der Druckformrohling wird nach der Aufnahme der Information und nach seiner Bearbeitung zur Druckform. Meist ist er ein Körper aus Metall oder Plast oder einer Kombination aus beiden. Der Druckformrohling ist entsprechend der Druckmaschine als plan- oder zylinderförmiger Körper ausgebildet bzw. liegt als flexible Folie vor, die aufgespannt werden muß. Im Tiefdruck ist er ein vollständiger Zylinder, der eine aufgalvanisierte geschlossene Kupferhaut trägt. In sie werden die Druckformvertiefungen hineingearbeitet. Nach dem Druck wird die alte Haut abgezogen und eine neue wieder aufgebaut.

Die Informationsübertragung auf den Rohling erfolgt mit Hilfe elektronisch gesteuerter Geräte (vgl. 17.1.2.) oder im Fotokopierverfahren mit Hilfe der *Härtekontrastfotografie*. Dabei werden Schichten eingesetzt, die durch die Lichteinwirkung ihre Löslichkeit verändern.

Informationsübertragung auf den Druckformrohling im Hoch-, Flach- und Durchdruck. Die lichtempfindliche Schicht wird in einer gleichmäßigen Dicke auf den Druckformrohling aufgebracht. Während des Kopierprozesses wird sie an den transparenten Stellen des aufgelegten

Informationszwischenträgers vom Licht getroffen. Diese Partien verlieren ihre Löslichkeit gegenüber einem Lösungsmittel. Auch das umgekehrte Prinzip ist möglich, dabei werden die vom Licht getroffenen Stellen gelöst. So entsteht auf der Oberfläche des Rohlings eine partiell verteilte Schicht, die der Information des Informationszwischenträgers entspricht. Als partielle *Schutzschicht* läßt sie eine Weiterbearbeitung der Oberfläche zu (z. B. Ätzen) oder aber gibt als partielle *Deckschicht* der Oberfläche sofort Druckformeigenschaften (z. B. Offsetformenherstellung). Im Durchdruck (Siebdruck) entstehen an den gelösten Stellen farbdurchlässige Siebpartien.

Informationsübertragung auf den Druckformrohling im Tiefdruck. Im Tiefdruck wird die Information zunächst auf ein Zwischenglied, das *Pigmentpapier*, übertragen. Es ist ein gelatinebeschichtetes Papier, das durch entsprechende Präparation lichtempfindlich wird. Die Bildkopie mit vorhergehender Kopie eines Tiefdruckrasters überträgt die Information auf das nach dem Härtekontrastprinzip arbeitende Pigmentpapier. Entsprechend dem Halbton-Informationszwischenträger bildet sich eine mehr oder weniger gehärtete Schicht auf dem Pigmentpapier aus. Es entsteht ein *Gelatinerelief*, das die auf dem Informationszwischenträger als Schwärzung gespeicherte Information enthält. Danach wird das Pigmentpapier auf den Zylinder übertragen, wobei die Gelatineschicht auf diesem aufliegt. Die Papierunterlage sowie die nicht belichteten und deshalb nicht gehärteten Gelatinepartien werden während der Wasserentwicklung aufgelöst und abgetragen. Danach trägt der Zylinder nur noch das Gelatinerelief. Die Besonderheit besteht hier nicht darin, daß gehärtete Partien bestimmte Oberflächenstellen abdecken und andere Stellen frei sind, sondern daß die gesamte Oberfläche mit einer mehr oder weniger dicken Gelatineschicht überzogen ist. Bei der weiteren Bearbeitung (Ätzung) müssen entsprechende Medien durch diese Schicht diffundieren.

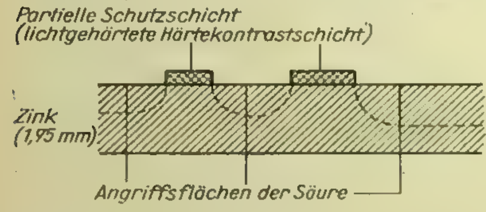


Abb. 17.1.5-2 Herstellung einer Hochdruckätzung

Arbeitsverfahren der Druckformrohlingsbearbeitung und Druckformenarten. Entsprechend der eingesetzten Druckverfahren sind die Druckformen entweder *reliefartig*, *durchbrochen* oder durch *Änderung ihrer Oberflächeneigenschaften* ausgebildet. Diese Eigenschaften lassen sich durch bestimmte Grundverfahren erreichen. Trennende Arbeitsverfahren haben gegenwärtig die größte Bedeutung (Tab. 17.1.5-1).

Herstellung von Ätzungen und Auswaschformen für den Hoch-, Flach- und Tiefdruck. ***Hochdruckätzungen*** werden nach der Informationsübertragung durch Abtragen der nichtgeschützten Metallpartien mittels Säure hergestellt (Abb. 17.1.5-2). Die besondere Problematik hierbei ist, daß die entstehenden Reliefelemente auch seitlich angegriffen werden. Das erfordert ein Ätzen in mehreren Stufen mit Zwischenabdeckungen (*Mehrstufenätzung*). Bei der *Einstufenätzung* wird dem Säurematerial ein Netzmittel zugegeben, das durch die Arbeitsweise der Einstufenätzmaschine die Flanken schützt und das seitliche Unterätzen verhindert. Das Druckformmaterial ist in der Regel Zink, das Ätzmittel Salpetersäure. *Hochdruckauswaschformen* werden durch den Einsatz von Fotopolymeren hergestellt. Dabei wird das lichtempfindliche Plastmaterial mit Hilfe eines Informationszwischenträgers belichtet. Danach werden die vom Licht nicht getroffenen Teile herausgelöst (ausgewaschen), es entsteht ein Relief. Solche Druckformen haben eine hohe Qualität und sind gegenüber mechanischer Beanspruchung sehr widerstandsfähig.

Bei ***Flachdruckätzungen*** wird eine dünne, über einer Kupferschicht liegende Chromschicht (10^{-3} mm) durchgeätzt (Abb. 17.1.5-3). Das Ätzmaterial ist z. B. eine Kalziumchloridlösung. Durch das Nebeneinanderliegen von Chrom- und

Tab. 17.1.5–1 *Arbeitsverfahren der Druckformrohlingsbearbeitung und Druckformenarten*

Grundverfahren	Arbeitsverfahren	erzeugte Druckform	Druckverfahren
Trennen	Ätzen	Ätzung	Hoch-, Flach-, Tiefdruck
	Auswaschen	Auswaschform	Hoch-, Flach-, Tiefdruck
	Gravieren	Gravur	Hoch-, Tiefdruck
	Einbrennen	Einbrennform	Durchdruck
Beschichten	partielles Auftragen	Auftragform	Flachdruck
Eigenschaftsänderung	Belichten	Fotoform	Flach-, Elektrodruck
Urformen	Gießen	Metallstereo	Duplikatdruckformen des Hochdrucks
	Galvanisieren	Galvano	Duplikatdruckformen des Hochdrucks
Umformen	Abformen	Plaststereo	Duplikatdruckformen des Hochdrucks

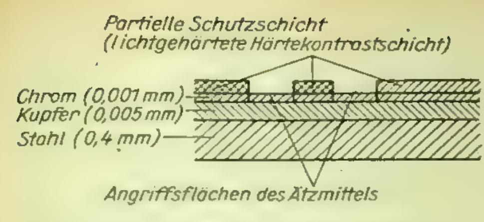


Abb. 17.1.5-3 Herstellung einer Flachdruckätzung (Trimetalldruckform)

Kupferpartien erhält die Oberfläche unterschiedliche Eigenschaften, die zu einer Differenzierung hinsichtlich der Feuchtmittel- (Wasser) bzw. Farbannahme (fetthaltig) führen. Die Druckform besteht aus einem Stahlträger und aufgalvanisierten Kupfer- und Chromschichten (*Trimetalldruckform*) oder nur aus einer Kupferhaut mit aufgalvanisierter Chromschicht (*Bimetalldruckform*).

Flachdruckauswaschformen setzen sich aus einem metallischen Träger und der sich darauf befindlichen partiell verteilten lichtempfindlichen Schicht der Härtekontrastfotografie zusammen (Abb. 17.1.5-4). Nach Informationsübertragung und kurzer Nachbehandlung ist die Druckform einsatzfähig. Die freiliegenden Metalloberflächen nehmen Feuchtmittel (Wasser) und die aufliegenden, lichtgehärteten Partien fetthaltige Farbe an.

Tiefdruckätzungen werden nach der Übertragung des Gelatinereliefs durch Diffusion des Ätzmittels (Eisen(III)chlorid) und anschließendes partielles Abtragen der Kupferoberfläche hergestellt (Abb. 17.1.5-5). Bei der manuellen Ätzung wird die Steuerung des Prozesses durch den Einsatz von verschiedenen Bädern mit unterschiedlicher Dichte ermöglicht (*Mehrbadätzung*). In Ätzmaschinen wird der Vorgang elektronisch gesteuert. Meist wird dabei nur mit einer Baddichte gearbeitet (*Einbadätzung*). Die so hergestellten tiefenvariablen Tiefdruckformen besitzen verschieden tiefe Rasternäpfchen, deren Grundform durch die Rasterkopie vor der Informationsübertragung und deren Tiefe durch die Bildkopie festgelegt wird. Sie ermöglichen der niedrigviskosen Tiefdruckfarbe die Haftung in den Vertiefungen der Druckform und der beim Druck notwendigen Rakel die Abstützung (vgl. 17.2.3.).

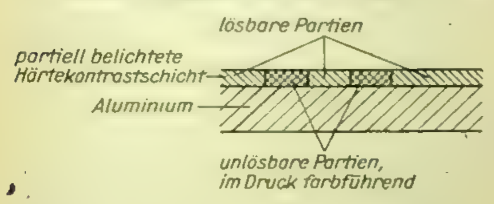


Abb. 17.1.5-4 Herstellung einer Flachdruckauswaschform. Die Härtekontrastschicht überträgt die Information und bildet gleichzeitig als Bestandteil der Druckform die farbführenden Partien

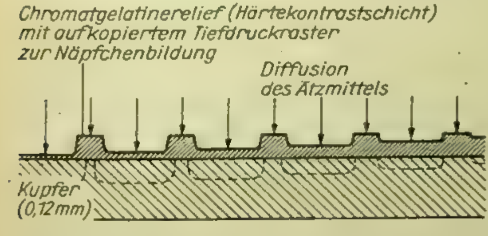


Abb. 17.1.5-5 Herstellung einer tiefenvariablen Tiefdruckätzung. Das Gelatinerelief ist 0.002 bis 0.015 mm dick, geätzte Näpfchentiefe 0.02 bis 0.04 mm

Herstellung von Flachdruckformen durch partielles Auftragen. Auf einen Metallträger werden partiell Lacke und Farben aufgebracht. Diese Stellen nehmen im Druckprozeß fetthaltige Farbe an, während die unverdeckten Metalloberflächen Feuchtmittel annehmen.

Herstellung von Fotoformen. Flachdruckformen lassen sich auch durch direkte Belichtung und ohne weitere Materialbewegung erzeugen. Dabei werden die Oberflächeneigenschaften der Stoffe verändert. Die wichtigste Druckform dieser Art ist die *Lichtdruckform*. Dabei wird die Härtekontrastschicht (Chromatgelatine) über ein Halbtonnegativ mehr oder weniger gehärtet und so die Feuchtmittel- bzw. Farbannahme differenziert. Der Lichtdruck ist ein rasterloses Verfahren und ermöglicht eine hohe Qualität bei der Wiedergabe von Illustrationen. Die Auflagenbeständigkeit der Gelatinedruckform ist allerdings sehr gering.

Herstellung von Durchdruckformen. Durchdruckformen werden fast ausschließlich als *Auswaschformen* hergestellt. Dabei werden Siebe (Siebdruck) mit Material der Härtekontrastfotografie beschichtet. Nach der Kopie werden die unbelichteten Teile herausgewaschen, sie bilden die farbdurchlässigen Partien. Elektronisch gesteuert lassen sich für den Durchdruck *Einbrennformen* erzeugen. Dabei wird eine Plastfolie zwischen 2 Funkenelektroden geführt und nach dem Arbeitsprinzip elektronischer Abtast- und Wiedergabegeräte (vgl. 17.1.2.) durch Funkenbildung durchbrochen.

Herstellung von Stahlstichdruckformen und der Notenstich. Der *Stahlstichdruck* ist ein spezielles Tiefdruckverfahren (vgl. 17.2.3.). Das Druckbild wird manuell mit Sticheln, durch Ätzen oder mit Hilfe einer Graviermaschine in eine enthärtete und später wieder gehärtete Stahlplatte eingearbeitet.

Beim *Notenstich* werden mit Stempeln und Sticheln die Notenzeichen, z. T. einschließlich des Textes, in die aus einer Bleilegierung bestehende

Platte eingeschlagen bzw. eingestochen. Diese besondere Tiefdruckform wird im Umdruckverfahren zur Herstellung von Auftragdruckformen für den Flachdruck bzw. zur Herstellung von fotografisch weiterverarbeitbaren Vorlagen eingesetzt.

17.1.6. Vergütung von Druckformen und Herstellung von Duplikatformen für den Hochdruck

Druckformvergütungen werden bei Reliefdruckformen mit hoher Beanspruchung vorgenommen. Dabei wird auf galvanischem Wege ein Hartmetallniederschlag erzeugt. Die relativ weichen Kupfer-, Zink- und Bleidruckformen des Hoch- und Tiefdrucks werden dadurch für hohe Auflagen einsetzbar.
Im Hochdruck besteht die Möglichkeit der *Duplikatformenherstellung*. Ausgangspunkt ist eine bereits vorhandene Druckform. Sie wird zunächst plastisch abgeformt und so ein neuer Zwischenträger gewonnen. Er stellt die Matrize der Druckform dar. Durch Ausgießen mit einer Bleilegierung (*Metallstereo*) bzw. Abformung in Plast (*Plaststereo*) oder Elast (*Flexodruckform*) werden Druckformen erzeugt. Die Matrize kann auch einen galvanischen Niederschlag erhalten. Nach seiner Hinterfütterung mit Plast oder Metall entsteht die Druckform (*Galvano*). Duplikatdruckformen werden zur Schonung der Originaldruckformen oder bei Bedarf mehrerer Druckformen angefertigt.

17.2. Druck

Die partielle Farbübertragung wird von der Druckform in der Druckmaschine während des Druckprozesses vorgenommen. Durch die Druckform wird das Druckverfahren, die Art und Weise der Farbübertragung, festgelegt. Die Farbübertragung muß bei Einhaltung einer optimalen

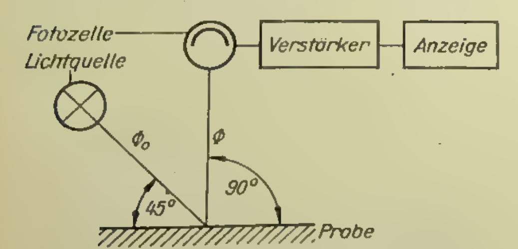
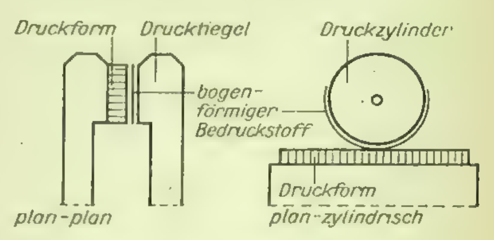


Abb. 17.2.0-1 *Arbeitsprinzip eines Densitometers. Φ_0 = aufgegebener, Φ = reflektierter Lichtstrom. Φ_0 wird mit dem reflektierten Lichtstrom eines Normals gleichgesetzt*

Farbschichtdicke stand- und passergerecht vorgenommen werden. Zur Einhaltung dieser Qualitätsmerkmale sind *Kontrollelemente* eingesetzt. Sie bestehen aus mitgedruckten Vollflächen-, Raster- und Linienfeldern. Das wichtigste Meßinstrument zur Überprüfung der Druckqualität ist das *Densitometer* (Abb. 17.2.0-1). Mit ihm wird die *optische Dichte D* gemessen. Sie drückt die optischen Eigenschaften von Oberflächen aus und ist definiert durch $D = \lg \Phi_0/\Phi$. Dabei ist Φ_0 der aufgegebene und Φ der reflektierte Lichtstrom der gemessenen Oberfläche.



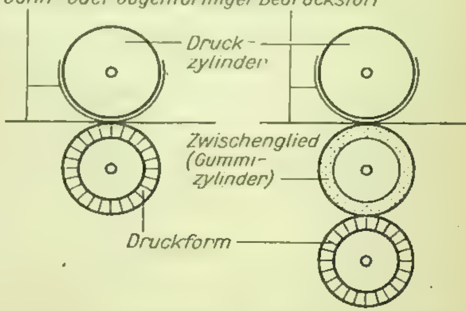


Abb. 17.2.0-2 *Grundprinzip der Druckwerkgestaltung*

Druckmaschinen bestehen im wesentlichen aus 3 Baugruppen: Druckwerke, Farbwerke und Elemente zur Bedruckstoffförderung.
Das *Druckwerk* nimmt die Druckform auf und bringt den Bedruckstoff mit ihr in Kontakt. Druckformen bzw. Druckformenträger und die Gegendruckkörper (Drucktiegel, -zylinder) können plan- oder zylinderförmig ausgebildet sein. Die Farbübertragung kann direkt von der Druckform auf den Bedruckstoff oder indirekt über ein Zwischenglied, z. B. einen Gummizylinder, vorgenommen werden (Abb. 17.2.0-2).
Das *Farbwerk* versorgt die Druckform mit Druckfarbe. Es ist in Hoch- und Flachdruckmaschinen als Walzenkette vom Farbkasten bis zur Druckform ausgebildet. Tiefdruckfarbwerke bestehen aus Farbbehältern, in die die Druckform eintaucht bzw. aus denen sie über nur eine Walze mit Farbe versorgt wird. Der *Bedruckstoff* (in der Regel Papier) kann als Bogen oder Bahn durch die Maschine geführt werden.

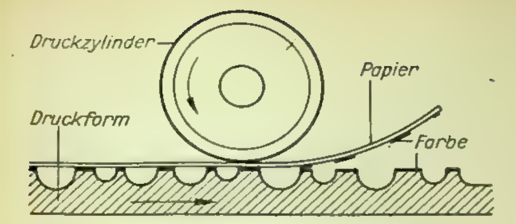


Abb. 17.2.1-1 Schema des Hochdrucks

17.2.1. Hochdruck

Die Reliefdruckform des Hochdrucks überträgt an den erhabenen Partien die Farbe (Abb. 17.2.1-1). Es werden alle 4 möglichen Prinzipe der Druckwerksgestaltung angewandt (vgl. Abb. 17.2.0-2). Die größte Bedeutung hat der rotative Druck.

Buchdruck. Druckformen aus Metall, Plast u. a. starren Materialien werden direkt auf den Bedruckstoff abgedruckt. Sie sind meist eine Mischung aus Satz- (Schriftdruckformen) und Originaldruckformen für Bilddarstellungen bzw. Duplikatdruckformen. Alle einzelnen Elemente müssen auf eine bestimmte Höhe, die *Normalschrifthöhe*, gebracht werden, um ein ordnungsgemäßes Abdrucken zu ermöglichen. Die Höhe wird mit dem Druckformhöhenprüfer gemessen und mit ± 0,01 mm eingehalten. Dadurch entfallen höhenausgleichende Justierarbeiten in der Druckmaschine. Da größere und kleinere druckende Elemente unterschiedlichen Druck benötigen, ist jedoch eine *Zurichtung* vor dem Druckbeginn erforderlich. Sie wird durch Herausschneiden oder Aufkleben von Papieren ausgeführt. Die gesamte Zurichtung wird auf dem *Aufzug*, der sich auf dem Druckzylinder befindet, untergebracht. Der Aufzug ist ein elastischer Mantel, der aus Papier u. a. Materialien zusammengesetzt ist. Die hochviskose Farbe erreicht über eine längere Walzenkette die Druckform (Abb. 17.2.1-2). Der Buchdruck läßt sich für alle Druckarbeiten einsetzen; er erreicht bei Verwendung glatter Papiere eine hohe Qualität im Mehrfarbenbilderdruck.

Flexodruck. Es werden Duplikatformen (vgl. 17.1.6.) aus Elast oder elastischem Plast hergestellt. Das Haupteinsatzgebiet ist der Packmittel- und Formulardruck. Dabei wird meist Rollenpapier verdruckt und eventuell anschließende Bearbeitungsgänge des Bedruckstoffs, wie Schneiden, Falzen oder Kleben, in der gleichen Maschine vorgenommen. Die elastischen Druckformen werden auf einen Zylinder montiert. Die Übertragung der niedrigviskosen Farbe auf die Druckform geschieht durch eine Farbauftragswalze, die von einer Tauchwalze versorgt wird. Auch Rasterwalzen werden zur Einfärbung eingesetzt.

Lettersetdruck ist *indirekter Hochdruck*. Sein Haupteinsatzgebiet ist der Packmitteldruck. In der Regel werden gravierte Hochdruckformen auf einen Gummizylinder abgedruckt und von diesem die Farbe auf den Bedruckstoff übertragen.

17.2.2. Flachdruck

Die zur Farbannahme notwendige Differenzierung der Druckform beruht auf den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften (Abb. 17.2.2-1) gegenüber Wasser (Feuchtmittel) und Fett (Farbe). Die Erzeugung der *hydrophilen* (was-

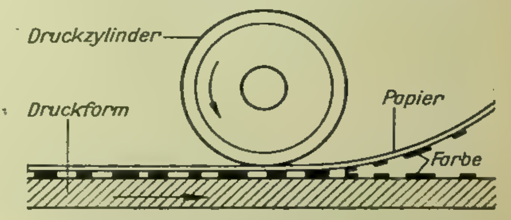


Abb. 17.2.2-1 Schema des Flachdrucks

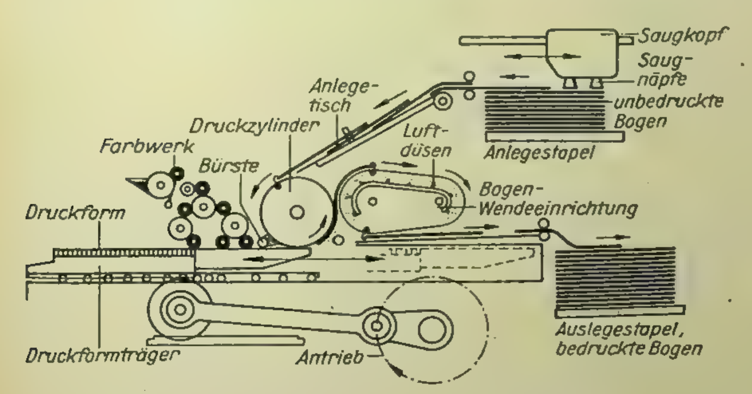


Abb. 17.2.1-2 Bogenhochdruckmaschine (Stoppzylinderprinzip)



Abb. 17.2.2-2 Flachdruckform nach dem Deckschichtprinzip. Die Eigenschaften des Grundmaterials werden partiell durch die der nur wenige Mikrometer dicken Deckschicht ersetzt

hydrophobe farbannehmende Bereiche
(Quellfähigkeit durch Lichteinwirkung
reduziert bzw. beseitigt)
Härtekontrastschicht
(Chromatgelatine)
Träger-
material
hydrophile Bereiche

Abb. 17.2.2-3 Flachdruckform nach dem Einschichtprinzip (die unterschiedlichen Eigenschaften werden durch partielle Veränderungen eines Materials hervorgerufen)

serfreundlichen) und *hydrophoben* (*wasserfeindlichen) Bereiche* erfolgt in der Hauptsache durch den Einsatz verschiedener Materialien mit hydrophilen bzw. hydrophoben Eigenschaften (*Deckschichtformen*, Abb. 17.2.2-2). Zu einem geringeren Teil wird bei *Einschichtformen* auch die partielle Veränderung der Oberflächeneigenschaften eines Materials durch Lichteinwirkung vorgenommen (Abb. 17.2.2-3). Die Quellfähigkeit der Schichten der Härtekontrastfotografie wird gegenüber dem Feuchtmittel verändert und so eine Differenzierung erreicht.

Der Druckprozeß wird mit der *Feuchtung* der Druckform eingeleitet. Erst danach ist sie funktionsfähig, indem die hydrophilen Bereiche das Feuchtmittel tragen. Während des Druckvorgangs muß das Feuchtmittel ständig ersetzt werden. Dadurch benötigen Flachdruckmaschinen zum *Farbwerk* zusätzlich ein *Feuchtwerk*. Mehr als in anderen Druckverfahren muß die Farbe mit den Eigenschaften der Druckformoberfläche abgestimmt sein. Die Farbe ist *hochviskos* und erfordert zum Transport und zur Vergleichmäßigung eine Walzenkette. Das *Feuchtmittel* besteht aus Wasser mit Netzmittelzusätzen. Probleme entstehen durch den ständigen Kontakt von Farbe und Feuchtmittel während des Druckvorgangs.

Offsetdruck ist ein *indirekter Flachdruck*. Die ausschließlich nach dem Deckschichtprinzip erzeugte Druckform überträgt ihre Farbe über einen Gummizylinder auf den Bedruckstoff. Die schnelle Druckformenherstellung, die hohe Qualität bei der Bildwiedergabe und die hohen Druckgeschwindigkeiten haben das Offsetdruckverfahren zum Hauptdruckverfahren gemacht. Die Druckmaschinen werden ausschließlich nach dem rotativen Prinzip gebaut. *Offsetdruckformen* sind biegsame Bleche oder Folien. Sie werden auf den Druckformzylinder aufgespannt. Während der Druckformenherstellung (vgl. 17.1.5.) können sie daher in günstiger planliegender Form bearbeitet werden. Offsetdruckmaschinen sind oft in großen Formaten und als Mehrfarbenmaschinen ausgelegt (Tafel 72). Dabei werden die benötigten 4 oder mehr Farben in einem Durchlauf gedruckt (Abb. 17.2.2-4).

Steindruck und Zinkdruck. Beide Flachdruckverfahren haben heute keine technische Bedeutung mehr. Sie übertragen die Farbe direkt von der Druckform auf den Bedruckstoff. Beim Steindruck (Lithografie) wurde als Druckform ein Kalkschiefer, beim Zinkdruck gekörntes Zinkblech eingesetzt.

Blechdruck entspricht dem Offsetdruckverfahren. Der Bedruckstoff ist Blechmaterial. Durch seine starre Oberfläche mußten elastische Zwischenglieder (Gummizylinder) eingefügt werden. So entwickelte sich dieses Verfahren als erstes indirektes Druckverfahren.

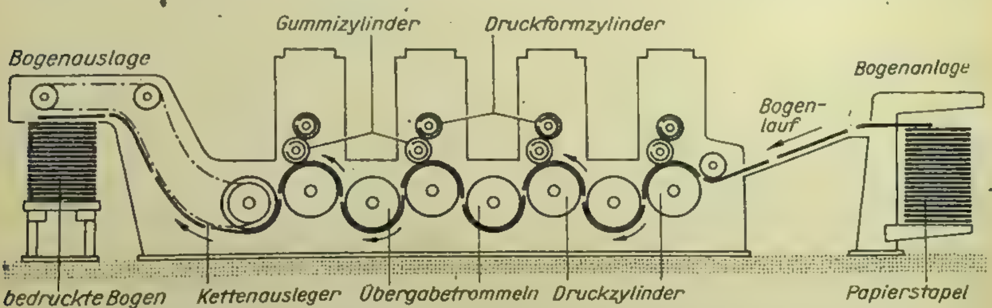


Abb. 17.2.2-4 Automatisierte Bogenoffset-Vierfarbendruckmaschine „Planeta-Variant" (kann nach dem Baukastenprinzip als Ein- oder Mehrfarbenmaschine verwendet werden)

Lichtdruck. Der Lichtdruck arbeitet als einziges technisch bedeutungsvolles Flachdruckverfahren nach dem Einschichtprinzip. Er gehört zu den wenigen *rasterlosen Druckverfahren*. Glasplatten (Planlichtdruck) oder Folien (Rotationslichtdruck) werden mit Chromatgelatine, einer Härtekontrastschicht, beschichtet (vgl. 17.1.5.). Die Farbe wird direkt an den Bedruckstoff übergeben. Ein sog. *Runzelkorn* stellt die Struktur des Bildes dar. Seine Unregelmäßigkeit ist für die Bildwiedergabe günstig. Der Lichtdruck wird besonders bei detailgenauer Wiedergabe und wertvollen Reproduktionen eingesetzt.

17.2.3. Tiefdruck

Die Reliefdruckformen des Tiefdrucks übertragen die Farbe aus vertieften Partien (Abb. 17.2.3-1). Unterschiedliche Tiefe der Näpfchen lassen im *tiefenvariablen Tiefdruck* die Übertragung unterschiedlicher Farbmengen innerhalb eines Bildes zu (Abb. 17.2.3-2). Das ist für die Wiedergabe von Illustrationen ganz besonders günstig. Beim weniger bedeutungsvollen *flächenvariablen Tiefdruck* muß mit einem Raster gearbeitet werden, der die Tonwerte des Bildes erzeugt (Abb. 17.2.3-3). Im Tiefdruck kommt grundsätzlich die gesamte Oberfläche der Druckform mit der Druckfarbe in Berührung. Eine Reinigung der erhabenen Partien ist vor dem Druck notwendig.

Rakeltiefdruck. Der *Rakeltiefdruck mit tiefenvariabler Druckform* ist der Hauptvertreter des Tiefdrucks. Dabei wird eine *Rakel* zur Reinigung der hochstehenden Partien nach der Einfärbung benutzt. Sie ist ein Stahlmesser, das an den Druckformzylinder anliegt und sich der Oberfläche gut anschmiegt. Damit die Farbe nicht aus den Vertiefungen abgerakelt wird, ist eine spezielle Rasterung des gesamten Druckbildes notwendig. Sie besteht aus einem Kreuzliniennetz, das alle Vertiefungen durchzieht und *Näpfchen* bildet. Darauf stützt sich die Rakel ab. Außerdem bieten die kleinen Näpfchen der niedrigviskosen Tiefdruckfarbe gute Adhäsionsmöglichkeiten. Auch das Schriftdruckbild enthält das Liniennetz. Die Rasterung im Tiefdruck ist völlig anders geartet als die im Hoch- und Flachdruck.

Von *flächenvariablen Tiefdruckformen* kann in gleicher Weise gedruckt werden. Im Rakeldruck werden ausschließlich Rotationsdruckmaschinen für Ein- und Mehrfarbendruck eingesetzt. Vorzugsweise wird Rollenpapier verarbeitet. Auf Tiefdruck-Rollenrotationsdruckmaschinen werden illustrierte Drucksachen in großen Auflagen schnell und billig hergestellt, wie z. B. Wochenillustrierte, Funk- und Fernsehprogramme, Modezeitschriften u. a. In der Packmittelherstellung wird der Tiefdruck vielfach für das Bedrucken von Papier, Metall- und Plastfolien eingesetzt. Dabei wird oft von der Rolle gedruckt,

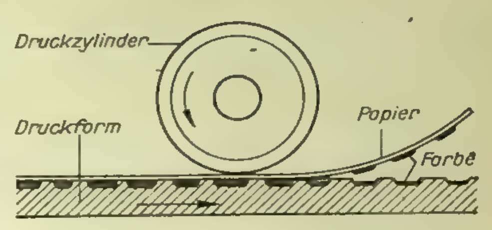
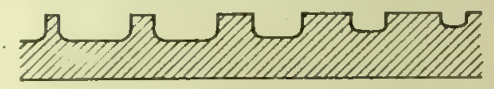


Abb. 17.2.3-1 Schema des Tiefdrucks


Abb. 17.2.3-2 Tiefenvariable Tiefdruckform


Abb. 17.2.3-3 Flächenvariable Tiefdruckform

das Material wieder aufgewickelt und einer Weiterverarbeitung zugeleitet. Wegen der großen Beanspruchung werden die Tiefdruckformen in der Regel galvanisch verchromt. Die Druckfarben für den Rakeltiefdruck enthalten wegen der Einstellung einer bestimmten Viskosität und zur Beschleunigung des Trockenvorgangs leicht flüchtige organische Lösungsmittel, z. B. Toluol, Xylol u. a., die nach dem Austreten aus der Farbe abgesaugt werden müssen. Die Farb- und Druckwerke sind abgekapselt (Tafel 72) und meist an eine *Absaugvorrichtung mit Lösungsmittelrückgewinnung* angeschlossen.

Stahlstichdruck. *Stahlstichdruckformen* tragen in sich geschlossene, vertiefte, druckende Partien, wodurch eine sehr gute Konturenwiedergabe bei Schrift und Linien möglich wird. Die hochviskose Farbe wird vom Bedruckstoff aus den Vertiefungen herausgehoben. Die Reinigung der hochstehenden Partien nach der Einfärbung erfolgt durch *Wischer*. Stahlstichdruckmaschinen verarbeiten Papierbogen und stellen im wesentlichen Banknoten, Briefmarken, Glückwunschkarten, Etiketten u. a. her. Beim *Stahlstichprägedruck* wird eine Gegenform verwendet, die von der Rückseite den Bedruckstoff in die farbführende Vertiefung hineindrückt. Dadurch wird während der Farbübertragung die entsprechende Partie reliefartig erhöht.

Kupferstich, Radierung, Heliogravüre. Der *Kupferstich* ist die ursprüngliche Form des Tiefdrucks. Er wird heute nur noch für künstlerische Arbeiten eingesetzt. Dabei wird das Druckbild mit einem Stichel in die Kupferplatte eingegraben. Die hochviskose Druckfarbe wird nach dem Reinigen der hochstehenden Partien in einer Handpresse auf angefeuchtetes Papier übertragen. Gleiches gilt für die *Radierung*, die durch

Ätzen hergestellt wird. Dabei werden mit einer Radiernadel die Bildstellen auf einem Ätzgrund freigelegt und geätzt. Bei der *Heliogravüre* wird die Druckform mit einem Asphaltstaubkorn versehen und das Bild fotografisch übertragen.

17.2.4. Durchdruck

Der Durchdruck verwendet durchbrochene Druckformen (Schablonen). Die hochviskose Druckfarbe wird von einer Gummirakel durch die offenen Partien auf den darunterliegenden Bedruckstoff gedrückt (Abb. 17.2.4-1). Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist der *Siebdruck*. Er verwendet feinmaschige Gewebe mit ≈ 80 bis 120 Fäden/cm als Druckformrohlinge. Im Siebdruck können besonders günstig nichtsaugfähige Materialien bedruckt werden. Außerdem ist durch die Flexibilität der Druckform die Farbübertragung auf unplane Körper ohne Schwierigkeit möglich. Aus diesen Gründen wird er zum Bedrucken von Flaschen, Dosen u. a. Verpackungsgegenständen aus Glas, Plast und Metall eingesetzt. Zur Trocknung der relativ dicken Farbschichten sind besondere Ablageeinrichtungen notwendig. Große Bedeutung hat der Siebdruck in der Textiltechnik (Filmdruck). Zur Farbübertragung können bei Siebdruckmaschinen mit planförmigen Druckformen entweder die Rakel oder die Druckform beweglich sein. Beim Bedrucken von Textilien sind Druckmaschinen mit zylinderförmigen Sieben und Innenrakel üblich.

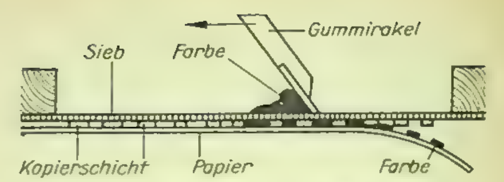


Abb. 17.2.4-1 Schema des Durchdrucks

17.3. Vervielfältigungstechnik

Die Vervielfältigungstechnik wird zur schnellen Herstellung von fixierten, optisch wahrnehmbaren Informationsträgern bei meist geringeren Qualitätsansprüchen und niedrigeren Auflagen als bei den Druckverfahren eingesetzt.

17.3.1. Fotografische Verfahren und Thermokopie

Neben der allgemein üblichen Fotografie werden Spezialverfahren, die ebenfalls auf der Grundlage von Silbersalzen arbeiten, eingesetzt.
Bei der *Reflexkopie* wird ein Spezialpapier mit der Schichtseite auf die Vorlage gelegt. Die durchdringenden Lichtstrahlen reflektieren an den weißen Stellen der Vorlage und erzeugen ein latentes, negatives Bild. Davon können in gleicher Weise beliebig viele seitenrichtige Positivkopien erzeugt werden.

Im *Diffusionsverfahren* wird ein spezielles Negativpapier reflektiert belichtet. Danach wird es in Kontakt mit einem Positivpapier gebracht. Bei dem dabei ablaufenden Entwicklungsvorgang diffundiert das unbelichtete Silbersalz in das Positivpapier und wird reduziert. Von einem Negativ können mehrere Abzüge gewonnen werden.
Der *Bromsilberdruck* ist ein maschinelles Fotokopierverfahren, kein Druckverfahren. Dabei werden montierte Negative schrittweise auf eine Fotopapierbahn kopiert und anschließend durch die notwendigen Bäder eingeführt. Nach dem Trocknen wird die Bahn weiterverarbeitet. Haupteinsatzgebiete sind die Herstellung von Ansichtspostkarten und Werbematerialien.
Bei den verschiedenen *Lichtpausverfahren* werden lichtempfindliche Diazoverbindungen eingesetzt. Das damit beschichtete Papier wird mit einem transparenten Positiv in Kontakt gebracht und belichtet. Durch die Einwirkung des Lichts zerfallen die Diazoverbindungen. Die nichtbelichteten Partien verfärben sich bei der Entwicklung mit Ammoniakdämpfen.
Die *Elektrofotografie* (Ladungskontrastfotografie) verwendet Papier, das mit Fotohalbleitern, z. B. Zinkoxid, beschichtet ist. Die aufgebrachten elektrostatischen Ladungen werden durch Lichteinwirkung beseitigt. Die nicht vom Licht getroffenen Partien behalten die Ladungen und nehmen in einem anschließenden Einfärbevorgang entsprechend geladenes Farbpulver an. Ein Anschmelzvorgang fixiert das Bild.
Thermokopierverfahren arbeiten entweder mit wärmeempfindlichen Schichten, die durch Einwirkung der Wärmestrahlung einen Farbumschlag zeigen, oder mit Kopierpapieren, deren Schicht beim partiellen Wärmestau schmilzt und auf ein anderes Papier übertragen wird.

17.3.2. Verfahren mit Farbübertragung

In kleinen Metallplatten (Platinen) werden mit Hilfe einer Prägemaschine die Texte eingeprägt und im *Prägemetallplattendruck* auf einer Adressiermaschine abgedruckt. Das *Metallblattverfahren* nutzt dünne, mit einem feinen geprägten Raster versehene Aluminiumfolien. Beim Beschreiben dieser Folie mit Maschine oder Griffel werden auf der Rückseite Erhebungen des Schriftbildes erzeugt. In speziellen Bürodruckmaschinen können mehrere Tausend Abzüge

hergestellt werden. Beide Verfahren arbeiten nach dem Prinzip des Hochdrucks (vgl. 17.2.1).

Der *kleinformatige Offsetdruck* entspricht in seinem Grundprinzip dem großformatigen Offsetdruck. Spezielle Verfahren wurden zur Vereinfachung und Prozeßbeschleunigung in der Druckformenherstellung entwickelt. So werden neben Metalldruckformen auch Papierdruckformen eingesetzt. Außerdem kann neben den fotografischen Übertragungsverfahren auch eine Direktbeschriftung der Druckformrohlinge erfolgen. Bei der fotografischen Druckformenherstellung werden Diffusionsverfahren und elektrofotografische Verfahren eingesetzt. Spezielle Druckformrohlinge mit aufgebrachter elektrofotografischer Schicht können ohne Zwischenträger direkt belichtet und zur Druckform entwickelt werden. Außerdem ist ein indirektes Arbeiten durch Übertragen der Farbe von einer Selenplatte auf den Druckformrohling möglich. Auch Druckformen, die den Härtekontrasteffekt in Silberbromidgelatine nutzen, werden verwendet. Dieses Verfahren führt zu funktionsfähigen Druckformen durch Direktbelichtung ohne Zwischenträger. Alle Verfahren sind außerordentlich

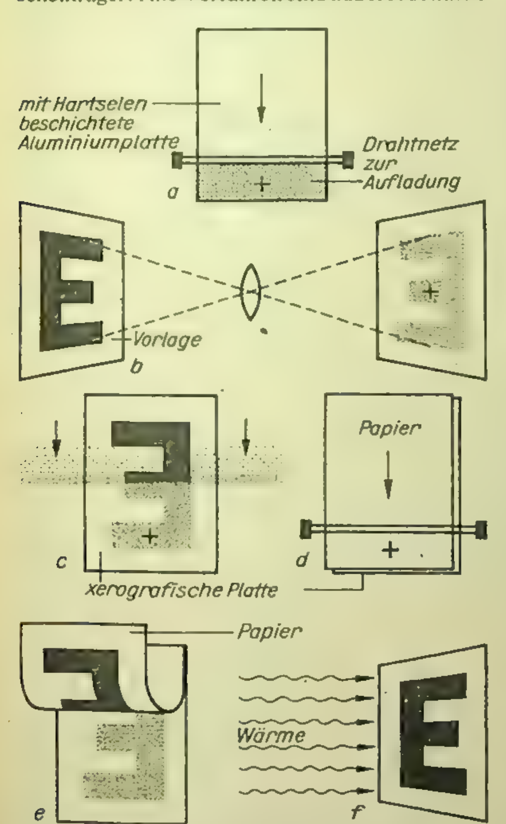


Abb. 17.3.2-1 Prinzip der Xerografie (Elektrodruck)

schnell und preisgünstig. Die kleinformatigen Druckmaschinen sind als Tischgeräte oder kleine Standgeräte mit unterschiedlichen Leistungen entwickelt worden. Bei entsprechender Druckformenherstellung lassen sich hochqualitative Mehrfarbendrucke erzeugen. Von den Druckformen können 10^4 und mehr Drucke erzielt werden. Damit ist der kleinformatige Offsetdruck neben der Xerografie das leistungsfähigste Vervielfältigungsverfahren.

Das *Sprit-Umdruck-Verfahren* löst von einem Papierblatt spritlösliche Farbe und überträgt sie auf ein anderes Blatt. Die Farbe wird durch einfaches Beschreiben von Kunstdruckpapier mit unterlegtem Umdruckfarbblatt (Sprit-Karbon-Papier) erzielt. Entsprechend der beim Schreiben übertragenen Farbschicht können über 100 Abzüge gefertigt werden.

Das Prinzip des *Durchdrucks* (vgl. 17.2.4.) wird bei solchen Verfahren angewandt, bei denen durch Beschriften farbundurchlässige Bestandteile in Papieren und Geweben (Wachsmatrizen, Japanseidenpapier u. a.) verdrängt bzw. zerstört werden.

Der *Elektrodruck* (*Xerografie*) nutzt Ladungsunterschiede zur differenzierten Farbannahme. Eine elektrostatisch aufgeladene Oberfläche enthält nach der Belichtung nur an den von Licht nicht getroffenen Stellen die Ladungen (Abb. 17.3.2-1a, b). Dort bleibt das entsprechend geladene Farbpulver haften und wird auf den Bedruckstoff übertragen (Abb. 17.3.2-1c, d, e). Anschließend wird die Farbe durch Anschmelzen fixiert (Abb. 17.3.2-1f).

17.3.3. Informationsausgabesysteme in EDVA

Durch die Steuerung von Typenhebeln oder -rädern, auf denen sich die Buchstaben erhaben befinden, werden ganze Zeilen oder einzelne Zeichen abgedruckt. Beim Mosaikdrucker werden einzelne Stifte so gesteuert, daß die entsprechenden Schriftzeichen rasterartig aufgebaut werden und die Schrift mosaikartig erscheint. Diese sog. *mechanischen Drucker* entnehmen die Farbe einem Farbband oder erhalten sie über Farbwalzen.

Nichtmechanische Drucker nutzen elektrostatische Prinzipe zur Erzeugung eines latenten Ladungsbildes durch Spitzenaufladung mit anschließendem Anfärben. *Elektrothermische Verfahren* verwenden stromempfindliche Funkenregistrierpapiere zum Beschriften. *Elektrochemische Verfahren* drücken Schreibnadeln an feuchtes Papier und erzeugen auf elektrolytischem Wege eine Verfärbung. Beim *Farbspritzen*, das auch in der Büro- und Fernschreibtechnik eingesetzt wird, tritt niedrigviskose Farbe aus

Düsen und wird nach dem Aufladen von elektrischen Feldern abgelenkt. Dadurch ist eine steuerbare Bildwiedergabe möglich. Die Farbe liegt tropfenförmig vor und baut punktartig das Bild auf.

17.4. Buchbindereitechnik

Nach dem Druckprozeß ist es notwendig, den Informationsträgern eine zweckmäßige äußere Form zu geben. Das typische Beispiel dafür ist der Blätterverband, das Buch oder die Broschur. Aber auch bei einfachen Erzeugnissen, dem einzelnen Blatt und der Lage, sind formgebende Arbeiten notwendig. Die Buchbindereitechnik umfaßt vor allem trennende, umformende und fügende Grundverfahren mit den wichtigen Arbeitsverfahren Schneiden, Falzen, Heften, Fadensiegeln und Kleben. Innerhalb des Prozesses liegen die Teilprozesse *Bogenbearbeitung*, *Blockbildung* und *-bearbeitung*, *Buchdecken-* und *Umschlagfertigung* und *Buchendfertigung*. Die Arbeiten in der Buchbinderei setzen mit dem Schneiden und Falzen der Bogen ein. Jedoch wird ein bedeutender Teil, vor allem in der Broschurenfertigung, bereits in Rotationsdruckmaschinen gefalzt. Es gibt Ansätze zur Entwicklung von *Fließlinien* von der Druckmaschine bis zur Herstellung des fertigen Buches. Dadurch entfällt die uneffektive Bogenbehandlung in der Buchbinderei. Statt dem Zusammentragen der Bogen kann das viel einfachere maschinelle Zusammenführen der Bahnen erfolgen. In der Buchbinderei sind Fließstrecken verbreitet. So werden die einfachen Rückstichbroschüren auf verketteten Arbeitsstationen vom Zusammentragen bis zum Beschneiden hergestellt (Sammelhefter mit Schneidstationen). Die Buchblockbearbeitung für die Broschuren- als auch für die Buchfertigung erfolgt auf verketteten Systemen.

17.4.1. Bogenbearbeitung

Meist ist nach dem Druck das Schneiden der vorliegenden Bogenstapel in *Messerschneidmaschinen* notwendig (Abb. 17.4.1-1, Tafel 73). In anderen Fällen, z. B. bei der Herstellung von Buchdecken und Umschlägen, wird das *Scherenschnittprinzip* genutzt. Dabei werden einzeln oder zweilagig Papiere, Pappen, Preßspan, Plastfolien und Aluminiumbleche bis 1 mm Dicke getrennt. Um eine leichte Förderung der Papierstapel zu ermöglichen, sind die Schneidmaschinentische mit einer *Luftkissenförderung* versehen. Mit Luftkanälen verbundene Bohrungen

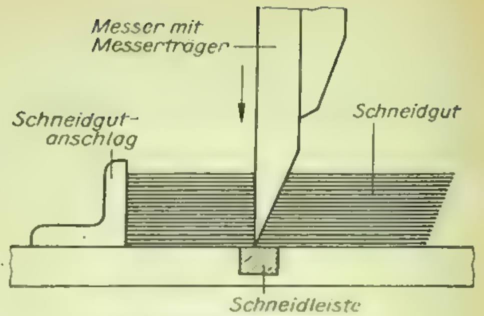


Abb. 17.4.1-1 Messerschnittprinzip

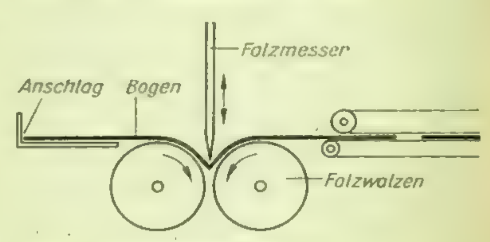


Abb. 17.4.1-2 Messerfalzprinzip

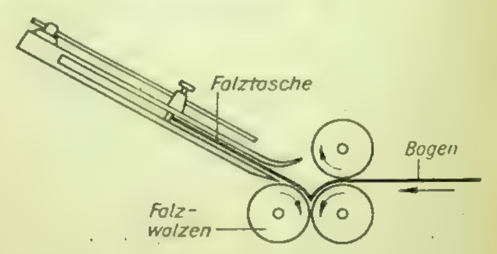


Abb. 17.4.1-3 Taschenfalzprinzip

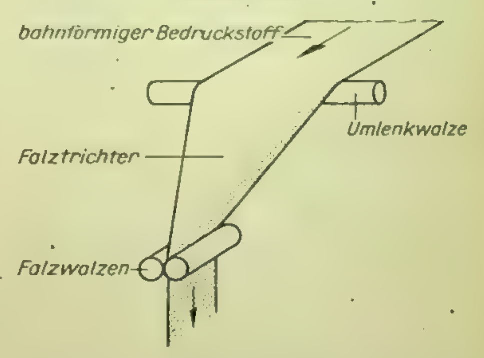


Abb. 17.4.1-4 Rollenfalzprinzip

werden an der Tischoberfläche durch in Federn gelagerte Kugeln verschlossen. Der aufgelegte Stapel drückt diese Kugeln nieder und läßt Luft aus den Bohrungen austreten. Dadurch bildet sich ein Luftkissen unter dem Stapel. Zum Schneiden von kleineren Erzeugnissen aus großen Bogen, z. B. Etiketten, sind Schneidmaschinen mit einer Programmsteuerung ausgerüstet.

Die Bogen werden anschließend auf einer *Falzmaschine* zu 4, 8, 16 oder 32 Seiten gefalzt. Die Falzungen werden im rechten Winkel (*Kreuzbruch*) oder parallel zueinander (*Parallelbruch*) ausgeführt und erzeugen die richtige Seitenfolge innerhalb des Bogens. Beim *Messerfalz* wird der Bogen im Stillstand durch ein Falzmesser zwischen 2 Falzwalzen geschlagen (Tafel 73). Die Walzen erfassen den Bogen und bilden einen scharfkantigen Falz (Abb. 17.4.1-2).
Beim *Stauch-* oder *Taschenfalz* läuft der Bogen in einer sog. Tasche gegen einen Anschlag (Tafel 73), wird an einer Stelle ausgeknickt und von 2 Riffelwalzen erfaßt, die den Falz bilden (Abb. 17.4.1-3). In Rotationsfalzmaschinen wird die laufende Papierbahn nach dem Bedrucken zum Falzen über einen Falztrichter geführt und zwischen 2 Walzen gefalzt (*Rollenfalz*) (Abb. 17.4.1-4).
Die gefalzten Bogen werden stapelweise eingepreßt und so die noch innerhalb der Bogen befindliche Luft entfernt. Dem ersten und letzten Bogen, Titel- und Endbogen genannt, wird je ein einmal gefalztes, festes und oft unbedrucktes Doppelblatt, das *Vorsatz*, angeklebt. Es dient mit Unterstützung der an den Buchblock später angehefteten Gaze der besseren Verbindung zwischen Buchblock und Decke.

17.4.2. Blockbildung und -bearbeitung

Zusammentragen. Bei der Buch- und Broschurenfertigung müssen die gefalzten Bogen in der richtigen Reihenfolge zusammengetragen werden. Zusammentragmaschinen entnehmen die Einzelbogen aus Magazinen und legen sie in der entsprechenden Reihenfolge auf ein Förderelement. Die Kontrolle der richtigen Reihenfolge nach dem Zusammentragen wird mit *Kollationieren* bezeichnet.
Bindeverfahren. Zur Erzeugung des Blätterverbands werden die Bogen an der Hinterkante hauptsächlich durch *Heften*, *Klebebinden* oder *Fadensiegeln* verbunden. Bei *einlagigen Broschuren* wird durch den Rücken mit Draht oder Faden geheftet. *Mehrlagige Broschuren* werden durch eine seitliche Blockheftung hergestellt (Abb. 17.4.2-1). *Buchblöcke* werden meist mit Faden mit oder ohne einen Gazestreifen geheftet

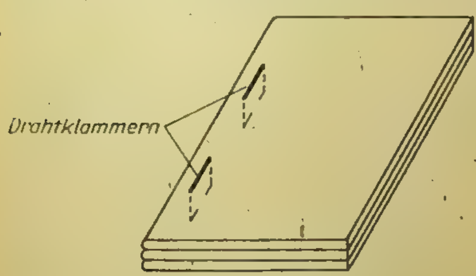


***Abb. 17.4.2-1** Seitliche Drahtheftung*

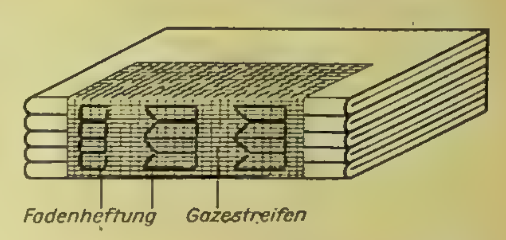


***Abb. 17.4.2-2** Auf Gaze gehefteter Buchblock*

(Tafel 74). Die einzelnen Bogen werden gewissermaßen aneinander genäht (Abb. 17.4.2-2). Die Drahtheftung wird in der Buchfertigung seltener angewandt. Dabei werden die Bogen an einen Gazestreifen, der am Rücken des Blocks anliegt, geheftet. Mit Ausnahme der in der Drahtrückstich- und Blockheftung hergestellten Broschuren müssen die Blöcke zur Erreichung eines festeren Zusammenhalts am Rücken geleimt bzw. beleimt und begazt werden. *Drahtheftmaschinen* sind z. T. mit einer Zusammentrageinrichtung gekoppelt.
Beim *Klebebinden* wird der Block durch einen speziellen, elastischen Klebstoffilm zusammengehalten. Dabei werden die Bogenrücken abgefräst oder aufgeschlitzt, um alle Blätter beleimen zu können. Beim anschließenden Auftragen dringt der Klebstoff z. T. in das Material ein, z. T. bildet er einen Oberflächenfilm. Voraussetzung für eine gute Haltbarkeit ist, daß alle Blatteile vom Klebstoff richtig erfaßt werden und gut eingebettet sind. Daher wird der Buchblock teilweise nach dem Abtrennen des Rückens gefächert, damit dem Klebstoff eine größere Angriffsfläche geboten wird. Die Klebebindetechnologie ist gegenüber anderen außerordentlich produktiv. Sie wird vor allen Dingen in Fließstrecken zur Buchblockbearbeitung angewandt. *Klebebindemaschinen* klemmen die Blöcke zwischen 2 Platten und führen sie an kreis- oder ovalförmig angeordneten Bearbeitungsstationen vorbei. Danach erfolgt der Ausstoß des bearbeiteten Buchblocks bzw. der mit dem Umschlag versehenen fertigen Broschur (Abb. 17.4.2-3).
Das *Fadensiegeln* entspricht dem Rückenheften. Dabei werden die Bogen mit einem siegelfähigen, durch Wärmeeinfluß verformbaren Faden geheftet. Ähnlich wie bei der Drahtheftung werden die durchgezogenen Enden umgelegt und durch Wärmeeinwirkung versiegelt. Die einzelnen Bogen halten durch die Rückenleimung und einen Fälzelstreifen zusammen. Das Fadensiegeln der Bogen wird nach dem Falzvorgang in der Falzmaschine durchgeführt (Tafel 74). Dadurch erhält dieses Verfahren eine außerordentlich hohe Produktivität bei sehr guter Qualität. *Weitere Bindeverfahren* verwenden metallische Klemm-

schienen, sowie durch Perforationen geführte Spiralen, Ringe und rollierte Kämme. Sie werden vor allem bei Prospekten, Kalendern u. a. eingesetzt.

Blockendfertigung und -ausstattung. Nach dem Rückenverleimen der Blöcke folgt das Beschneiden an 3 Seiten auf *Dreimessermaschinen* (Tafel 74). An den Schmalseiten wird durch

stärkung ein zäher, dünner Papierstreifen aufgeklebt. Das Hinterkleben erfolgt maschinell in Verbindung mit dem Kapitalen.

17.4.3. Buchdecken- und Umschlagfertigung

Der meist bedruckte einfache *Kartonumschlag* für Broschuren wird zurechtgeschnitten und durch Rillen an den vorgesehenen Bruchstellen

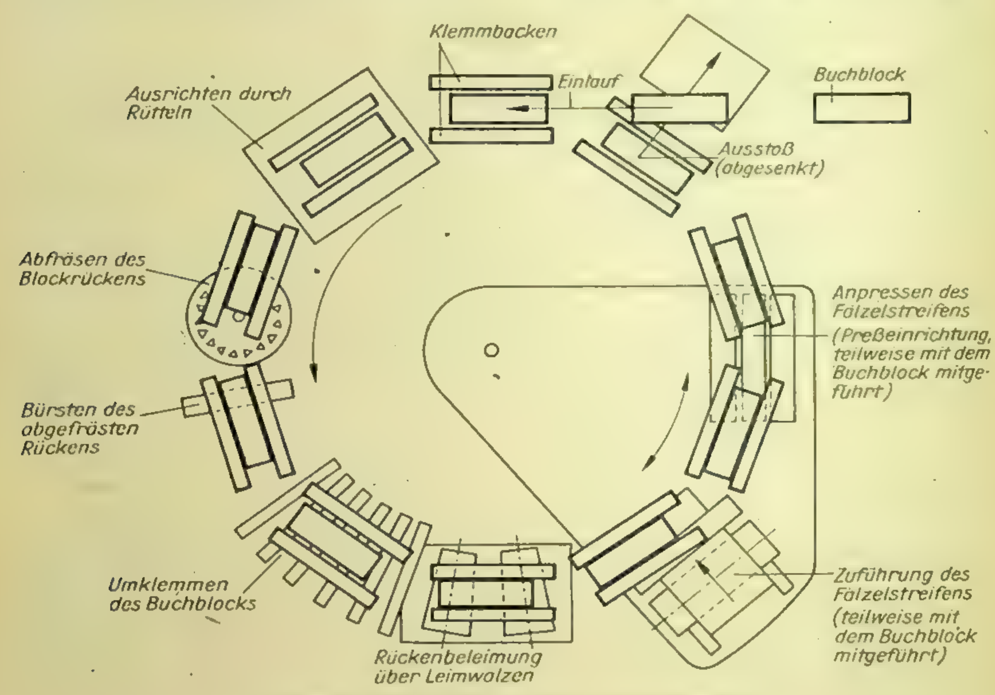


Abb. 17.4.2-3 Schema der Bearbeitungsstationen einer Klebebindemaschine

2 Messer gleichzeitig beschnitten, danach wird der vordere Schnitt ausgeführt. Der Buchblock erhält so sein endgültiges Format, und die einzelnen Blätter werden an 3 Seiten gelöst. Danach wird – besonders bei dickeren Büchern – der Buchblockrücken *gerundet*. Das *Schnittfärben* erfolgt durch das Auftragen von Farbe oder Metall (Gold, Silber, Aluminium). Das Runden und Schnittfärben wird aus ästhetischen Gründen und zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften durchgeführt. Belletristische und Nachschlagewerke erhalten häufig ein Band als Lesezeichen, von dem ein Ende am Rücken des Buchblocks angeklebt wird. Beim *Kapitalen* wird ein Textilband mit einer Wulstborte so an den Rücken des Blocks oben und unten aufgeklebt, daß der Wulst fest auf dem Buchschnitt aufsitzt. Es dient zur Verschönerung des Einbands. Vor der Verbindung mit der Buchdecke wird der Blockrücken *hinterklebt*. Dabei wird zur Ver-

vorbereitet. Umschläge für Rückstichbroschuren werden zusammen mit dem Bogen durch den Rücken geheftet. Bei Mehrlagenbroschuren erhalten die Umschläge, je nach Bindeart, 2 bis 4 Rillungen. Meist werden sie nach der Buchblockbildung sofort zugeführt und mit dem Block verbunden. Fälzelbroschuren mit seitlicher Heftung wird vor der Heftung je ein Kartonblatt auf- und untergelegt. Danach wird bis zu den gerillten Bruchstellen ein Fälzel über den Rücken geklebt.

Die *Integralbuchdecke* ist die einfachste Buchdecke. Sie besteht aus einem einzigen Kartonzuschnitt, der an den Biegestellen vorbereitet und allseitig eingeschlagen wird. Er erhält dadurch eine höhere Kantenstoßfestigkeit als die Broschurenumschläge.

Halbbandbuchdecken werden aus zusammengesetztem Einbandwerkstoff hergestellt. Als Material wird dabei Papier oder Gewebe, seltener

Leder oder Pergament, verwendet. Ein Materialstreifen, der Rückenbezugseinbandstoff, verbindet die beiden Deckelpappen und trägt in der Mitte eine Rückeinlage. Er wird oben und unten eingeschlagen. Danach werden die beiden Deckel mit je einem Seitenbezugszuschnitt bezogen und diese seitlich eingeschlagen. Das stärker beanspruchte Rückenbezugsmaterial wird aus dem jeweils widerstandsfähigerem Material gefertigt. Die gebräuchlichste Buchdecke dieser Art ist die *Halbgewebedecke*. Entsprechend können auch *Halbleder-* und *Halbpergamentdecken* produziert werden.
Ganzbandbuchdecken werden aus einteiligem Einbandwerkstoff hergestellt. Er verbindet die Deckelpappen und die dazwischenliegende Rückeneinlage miteinander. Der Einbandwerkstoff wird allseitig eingeschlagen. Häufig werden Bücher in Ganzgewebe oder Ganzpapierdecken eingehangen. Ganzleder- bzw. Ganzpergamenteinbände sind Sonderfällen vorbehalten.
In der industriellen Buchherstellung wird der Buchdeckenherstellung mit einteiligem Einbandwerkstoff aufgrund ihres wesentlich geringeren Fertigungsaufwands gegenüber den Buchdecken mit den zusammengesetzten Einbandwerkstoffen der Vorzug gegeben.
Buchdeckenmaschinen ziehen das erforderliche Material von einer Rolle ab, schneiden es zurecht oder entnehmen die fertigen Zuschnitte einem Magazin und verkleben die Teile miteinander. Im Anschluß daran wird durch das Deckenausbiegen der Rückenteil dem gerundeten Buchblockrükken angepaßt.
Plastbuchdecken werden aus PVC-Material auf *Hochfrequenzschweißanlagen* hergestellt. Die eingesetzten Schweiß- und Schneideelektroden entsprechen dem Deckenzuschnitt, damit wird das Deckenmaterial aus der Folie herausgetrennt. Plastbuchdecken können ein- oder mehrteilige PVC-Zuschnitte haben bzw. durch Pappeinlagen in den Deckelflächen und im Rücken verstärkt sein. Sie werden für oft beanspruchte Nachschlagebücher, für Fotoalben, Tagungs-, Schreib- und Unterschriftenmappen verwendet.
Buchdeckenverzierungen können auf die Zuschnitte vor der Deckenfertigung aufgedruckt sein oder nach der Deckenfertigung aufgebracht werden. Das Verzieren der fertigen Buchdecken erfolgt in Spezialdruckmaschinen, die mit Farbe oder mit Folie arbeiten. Der Durchdruck wird vor allen Dingen bei Plastbuchdecken angewandt. Schrift- und Schmuckelemente können auch un-

ter Zuhilfenahme von Wärme und Druck als Blindpressung vertieft in das Material eingebracht werden oder als Reliefprägungen erhaben erscheinen. Auf Plastbuchdecken können durch Applizieren mittels Hochfrequenzschweißung andersfarbige Folien in Form von Schrift oder Verzierung aufgebracht werden. Auch Einschweißungen unter Transparentfolien sind üblich.

17.4.4. Buchendfertigung

Die vorbereitete Buchdecke wird während des Arbeitsgangs *Einhängen* mit dem vorbereiteten Buchblock vereinigt (Abb. 17.4.4-1). Das geschieht durch das Ankleben des vorderen und

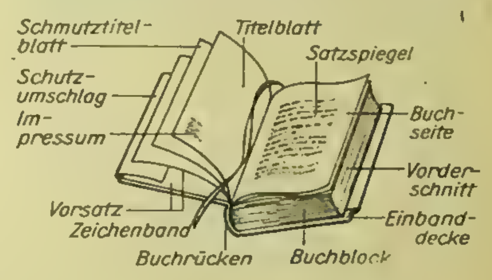


Abb. 17.4.4-1 Bestandteile eines Buches

hinteren Vorsatzblattes an die Innenseiten der beiden Buchdeckel. Diese Arbeit übernehmen Einhängemaschinen, die als Halbautomaten manuell beschickt werden oder als Vollautomaten in Fließstrecken stehen. Der Buchblock muß dabei in die Decke so eingepaßt werden, daß sie ringsherum mit gleichmäßiger Kante übersteht. Das *Einpressen* der fertigen Bücher sichert, daß das Vorsatz völlig faltenfrei und ohne hohle Stellen auf dem Buchdeckel klebt. Außerdem wird ein Verziehen der Buchdeckel unterdrückt. Die *Pressen* arbeiten pneumatisch oder hydraulisch und sind als Batterien zu 2 bis 4 vereinigt oder als Rundpressen ausgeführt. Die Preßzeit beträgt ≈ 10 min. Nach dem Einpressen trocknen die Bücher auf Paletten in ≈ 7 h völlig aus. Danach werden die an Vorder- und Rückseite sichtbaren *Gelenkfälze eingebrannt*. Durch beheizte Metallineale oder Rollen wird die Falzform scharf herausgearbeitet.

18. Verpackungstechnik

Mehr als 90% aller Erzeugnisse, in der Verpackungstechnik als „Güter" bezeichnet, werden verpackt. Aufgabe der Verpackung ist es, die Güter vor Beschädigung oder Verlust bei Transport, Warenumschlag und Lagerung optimal zu schützen. Sie macht in vielen Fällen ein Gut erst für den Verkauf geeignet, z. B. flüssige Waschmittel, Fertiggerichte.

Spezialisierung und Konzentration der Produktion stellen an die Verpackung zunehmend höhere Anforderungen. Sie ergeben sich vor allem durch:

— steigende Produktion und damit größere Mengen zu verpackender Güter,

— verstärkte Bestrebungen nach Rationalisierung im Handel, z. B. Selbstbedienung und Automatenverkauf,

— Vergrößerung des zeitlichen und räumlichen Abstands zwischen Herstellung und Verbrauch, verbunden mit gesteigerten Haltbarkeitsforderungen der Erzeugnisse, z. B. im Rahmen zunehmender Export- und Importbeziehungen.

Die noch beträchtlichen Warenverluste können durch zweckentsprechende Wahl der Verpackung unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Gutes, der Transport- und Lagerbedingungen sowie der Forderungen des Handels verringert werden.

Die Verpackungstechnik hat die Aufgabe, die rationelle Vorbereitung und Durchführung von Verpackungsprozessen durch technisch-ökonomisch begründeten Einsatz von Verpackungswerkstoffen, -mitteln, -hilfsmitteln sowie -maschinen und -hilfsmaschinen zu gewährleisten.

18.1. Verpackungsfunktionen

Schutzfunktion. Darunter ist das Erhalten der Qualität des Gutes zu verstehen, d. h. Schutz vor schädigenden Beanspruchungen, die z. B. Bruch, Aromaverlust, Schimmelbildung, Austrocknen, Korrosion hervorrufen können. Bei gefährlichen bzw. aggressiven Gütern ist nicht nur das Gut gegen Einwirkungen von außen zu schützen, sondern auch die Umgebung und die mit der Packung in Kontakt kommenden Menschen.

Rationalisierungsfunktion. Durch zweckmäßige Gestaltung der Verpackung werden Transport, Be- und Entladung sowie Lagerung erleichtert. Im Handel z. B. sind Verkaufsautomaten und Selbstbedienung und die damit verbundenen Arbeitskräfteeinsparungen erst durch die Verpackung der Güter möglich.

Informations- und Kommunikationsfunktion. Auf der Verpackung wird der Packungsinhalt hinsichtlich Hersteller, Menge, Preis, Warennummer usw. näher gekennzeichnet. Weiterhin kann sie Angaben zum Gebrauch oder Verbrauch des Gutes sowie Transport- und Lagerungshinweise tragen. Mit einer attraktiven Gestaltung der Verpackung wird für das Gut geworben.

18.2. Verpackungsprozeß

Der *Verpackungsprozeß* ist Bestandteil des Produktionsprozesses, meist dessen letzte Stufe, in der Gut und Verpackung zur Packung vereinigt werden. Er gehört zur Kategorie der Produktionshilfsprozesse und enthält folgende 3 Teilprozesse:

— Herstellen der Verbraucherpackung, z. B. Margarine in Plastbechern,

— Herstellen der Transportpackung, z. B. 12 Plastbecher in einer Schachtel,

— Herstellen der Ladeeinheit, z. B. 40 Schachteln mit Plastbechern auf einer Flachpalette (Palette, Behälter, Container; vgl. 10.6.2.).

Die Herstellung von Verpackungswerkstoffen, -mitteln und -hilfsmitteln für den Verpackungsprozeß erfolgt durch die Papier- und papierverarbeitende Industrie, die Chemie-, Glas-, Metall-, Holz- und Textilindustrie.

Die erforderlichen Maschinen kommen aus dem Verpackungsmaschinenbau sowie anderen Zweigen des Verarbeitungsmaschinenbaus.

Verpackungsoperationen. Zur Herstellung einer Packung sind die Verpackungsoperationen Formen, Füllen und Verschließen der Verpackung erforderlich.

Diese Operationen treten im Prinzip in allen 3 Teilprozessen des Verpackungsprozesses auf. Sie können territorial getrennt ausgeführt werden (z. B. Herstellen von Glasflaschen im Glaswerk, Füllen und Verschließen in der Brauerei) oder auf eine Maschine konzentriert sein (Formen, Füllen, Verschließen von Plastbeuteln für Milch). Die technische Realisierung der Verpackungsoperationen in Maschinen zur Herstellung von Verpackungsmitteln sowie auf Verpackungsmaschinen wird vorrangig durch die Art des Verpackungsstoffs und die Eigenschaften des Gutes bestimmt.

18.3. Gutgruppen

Eine Systematik der Vielzahl der zu verpackenden Güter ist nach unterschiedlichen Gesichtspunkten möglich. Allein z. B. nach dem Aggregatzustand eine Ordnung herzustellen, wäre für die Anwendung unzureichend. Für die Verpackungstechnik hat sich die Einteilung der Güter hinsichtlich ihres Fließverhaltens infolge der Eigenmasse als zweckmäßig erwiesen. Diese Eigenschaft des Gutes bestimmt weitestgehend den Aufbau der Verpackungsmaschinen, speziell der Füllstationen.

Flüssiges Gut fließt stets und sehr leicht durch seine Eigenmasse. Innerhalb dieser Gutgruppe wird zwischen *nichtschäumenden Gütern*, z. B. Milch und Spirituosen, und *gashaltigen Gütern*, wie Bier und Limonade, unterschieden. Dies ist notwendig, da gashaltige Güter unter Gegendruck abgefüllt werden müssen, um ein Entgasen zu verhindern.

Schüttgut. Neben leicht fließenden Gütern, wie Reis und Hülsenfrüchte, sind in dieser Gutgruppe auch schwererfließende Güter, z. B. Mehl oder Kakao, einzuordnen.

Pastöses Gut. In diese Gutgruppe werden infolge ihrer Eigenmasse nur unter Druckeinwirkung fließende Güter, wie Butter und Zahnpasta, eingeordnet.

Stückgut besteht aus starren Körpern, die einzeln oder in einer abgezählten Gruppe, z. B. Kekse, zusammengefaßt verpackt werden. Das Dosieren kann durch Abzählen oder Wägen erfolgen.

Gutgemische bestehen aus einer Kombination von Gutgruppen, z. B. Obstkonserven (Obst/Obstsaft) oder Fleischsalate (Fleisch/Mayonnaise). Die Fülltechnologie wird dem jeweiligen Gemisch angepaßt.

18.4. Verpackungswerkstoffe und Verpackungsmittel

Die wichtigsten Werkstoffe, aus denen Verpackungsmittel und -hilfsmittel hergestellt werden,

sind Papier, Karton, Pappe sowie Glas, Metall, Holz, Plast und Textilien.

Die Anteile der Verpackungswerkstoffe am Gesamtverbrauch sind in Tab. 18.4.0-1 dargestellt. Die Wertanteile sind national verschieden und weisen jährlich Schwankungen auf, die im wesentlichen auf die Rohstoffsituation und die dynamische Entwicklung der Verpackungsmittelkonstruktionen zurückzuführen sind.

Tab. 18.4.0-1 *Anteil der Verpackungswerkstoffe am Gesamtverbrauch (Näherungswerte)*

Verpackungswerkstoffe	%
Papier, Karton, Pappe	40
Glas	14
Metall	11
Holz	20
Plast	11
Textilien	4

18.4.1. Papier, Karton, Pappe

Die Technologie der Erzeugung (vgl. 7.6.) erlaubt es, eine Vielzahl in ihren Eigenschaften unterschiedliche Papiere, Kartone und Pappen relativ billig herzustellen. Die Begriffsbestimmung dieser Verpackungswerkstoffe bezieht sich auf die Masse je Flächeneinheit, wobei keine scharfe Abgrenzung vorliegt:

Papier 8 bis 250 g/m^2,
Karton 150 bis 600 g/m^2,
Pappe über 500 g/m^2.

Unveredelte Papiere, Kartone und Pappen besitzen nur begrenzte Festigkeits-, Beständigkeits- und Dichtigkeitseigenschaften. Damit erfüllen sie in vielen Fällen nicht die von ihnen geforderten Funktionen, so daß, abgesehen vom Übereinanderlegen mehrerer Umhüllungen, z. B. Innenbeutel u. ä., eine weitere Veredlung durch den Übergang zu mehrlagigen Verpackungswerkstoffen notwendig ist. Verpackungswerkstoffe, die aus mehreren Lagen des gleichen oder unterschiedlicher Werkstoffe bestehen, können durch Kleben, Kaschieren, Schweißen, Extrudieren u. a. Verfahren miteinander verbunden werden. Mit dieser Möglichkeit, den Verpackungswerkstoff an spezielle Schutzfunktionen des Gutes anzupassen, erhalten mehrlagige Verpackungswerkstoffe zunehmende Bedeutung.

Papier. *Packpapier* ist ein einlagiger Verpackungswerkstoff mit einer Masse je Flächeneinheit von 40 bis 200 g/m^2, der für das Einwickeln (Einschlagen), aber auch für die Herstellung von Beuteln eingesetzt wird. Es gibt lediglich begrenzten Schutz vor Staub und verträgt nur geringe mechanische Beanspruchungen.

Wachspapier ist ein mit Wachs beschichteter einlagiger Verpackungswerkstoff, der z. B. für das Einwickeln von Brot und Süßwaren eingesetzt wird. Er ist naßfest und besitzt eine höhere Fett- und Ölbeständigkeit. Durch den Zusatz besonders von Äthylenvinylazetat-Kopolymeren zum Wachs (Hotmelts) können verbesserte Dichtigkeitseigenschaften und Siegelfähigkeit erreicht werden.

Plastbeschichtetes Papier ist ein mit einer wäßrigen Dispersion von Kopolymerisaten oder durch Extrusion von Thermoplasten beschichtetes Papier mit einer Masse je Flächeneinheit von 50 bis 90 g/m², wobei der Beschichtungsauftrag von 15 bis 60 g/m² variabel gehalten werden kann. Es besitzt in Abhängigkeit von der Beschichtungsdicke steigende Dichtigkeitseigenschaften und ist heißsiegelfähig. Es wird für Lebensmittelverpackungen sowie für Papiersäcke für Chemikalien eingesetzt.

Karton. *Wickelkarton* ist ein mehrlagiger, in der Papiermaschine zusammengegautschter und geleimter Verpackungswerkstoff mit einer Masse je Flächeneinheit von 250 bis 450 g/m², welcher für das Wickeln und Ziehen von Rundgefäßen hergestellt wird. Die neben den geforderten Verarbeitungseigenschaften notwendigen Schutzfunktionen besonders hinsichtlich Dichtigkeit werden nötigenfalls durch Beschichten und/oder Kaschieren mit einem weiteren Verpackungswerkstoff erreicht.

Chromoersatzkarton wird aus 2 bis 3 Lagen in der Papiermaschine zusammengegautscht, wobei mindestens eine Deckbahn gegenüber den anderen Bahnen eine hochwertigere Stoffzusammensetzung besitzt. Er hat eine Masse je Flächeneinheit von 225 bis 500 g/m² und ist gut verarbeitbar. Die hochwertige Deckbahn garantiert eine bessere Bedruckbarkeit und ist Voraussetzung für die Realisierung einer höheren Kommunikationsfunktion. Hauptanwendungsgebiet ist der Einsatz für Schachteln der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie.

Kombinationswerkstoff ist ein mehrlagiger Verpackungswerkstoff, der z. B. aus mit Aluminiumfolie kaschiertem und mit Polyäthylen und/oder Paraffin beschichtetem Karton besteht. Diese Werkstoffkombination, vorwiegend für die Verpackung von Milch und nichtschäumenden flüssigen Gütern entwickelt, hat z. B. sehr gute Dichtigkeitseigenschaften und ist gut heißsiegelfähig.

Pappe. *Vollpappe* wird durch Zusammenführen und Gautschen mehrerer Lagen (vgl. 7.6.2.) hergestellt. Je nach Rohstoffeinsatz (Altpapier, Holz) werden mehrere Sorten von Pappen mit einer Masse je Flächeneinheit von 400 bis 2400 g/m² und guten Festigkeitseigenschaften, vorwiegend für Transportverpackungsmittel, gefertigt.

Wellpappe besteht aus mehreren miteinander verklebten Lagen glatter und v-förmig gewellter Papier- und/oder Kartonbahnen. Nach der Anzahl der Bahnen wird zwischen zwei-, drei-, fünf- und siebenfacher Wellpappe unterschieden. Nach der Größe der Wellen wird bei der gewellten Bahn in Grob-, Mittel- und Feinwelle unterteilt. Wellpappe besitzt bei geringer Masse eine hohe Festigkeit sowie eine gute Polsterwirkung. Zur Verbesserung der Beständigkeits- und Schutzeigenschaften kann sie durch Beschichten, Imprägnieren oder Kaschieren noch weiter veredelt werden. Aufgrund der Summe guter Eigenschaften gewinnt dieser Verpackungswerkstoff zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz des Werkstoffs erfolgt hauptsächlich für Transportverpackungsmittel, aber auch, mit hochwertigen bedruckten Deckbahnen versehen, für Verbraucherverpackungsmittel.

Verpackungsmittel aus Papier, Karton, Pappe. Die Anteile von Papier, Karton, Pappe für die Herstellung von Verpackungsmitteln verhalten sich etwa wie 50:33:17.

Beutel. Nach den konstruktiven Merkmalen werden *Flachbeutel* ohne und mit Seitenfalten und *Bodenbeutel* ohne und mit Seitenfalten unterschieden (Abb. 18.4.1-1).

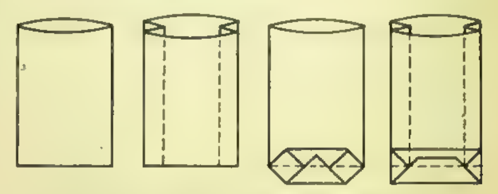


Abb. 18.4.1-1 Flach- und Bodenbeutel ohne und mit Seitenfalten

Die Beutel werden entweder in speziellen Beutelmaschinen aus einem Papierschlauch oder im Verpackungsprozeß selbst durch Formen um das Gut hergestellt. Verschlossen werden sie durch Zufalten, Zukleben oder Siegeln.

Beutel zeichnen sich durch vielseitige Verwendungsmöglichkeit, niedrigen Preis und geringe Masse aus. Sie nehmen im leeren Zustand einen geringen Transport- und Lagerraum ein und sind maschinell füll- und verschließbar. Durch Einsatz mehrlagiger Verpackungswerkstoffe werden gute Dichtigkeitseigenschaften erzielt.

Schachteln sind Verpackungsmittel aus Karton oder Pappe, die im Querschnitt an der Öffnung mindestens eine gerade Kante aufweisen und vorwiegend quaderförmige Gestalt haben. Die Fertigung erfolgt aus Bahnen oder Bogen überwiegend außerhalb des Verpackungsprozesses. Das Ausgangsmaterial wird bedruckt, und die zukünftigen Biegestellen der Schachteln werden gerillt oder geritzt. Die Außenform des herzustellenden Zuschnitts wird in demselben Arbeitsgang durch Stanzen erzeugt. Dieser Zuschnitt kann zu flachliegenden, faltbaren Schachteln verklebt

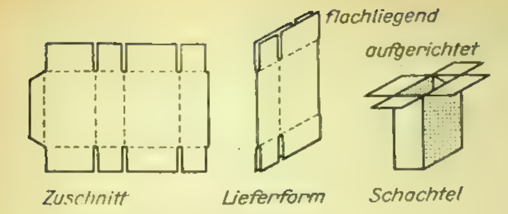


Abb. 18.4.1-2 Faltschachtel

oder zu starren, formfesten Schachteln, z. B. durch Eckenheftung mit Drahtklammern, verarbeitet werden. Da faltbare Schachteln sich jederzeit ohne Zerstörung wieder in einen flachliegenden Zustand zurückversetzen lassen, ergeben sich hinsichtlich des geringen Transport- und Lagervolumens der leeren Schachteln wesentliche Vorteile, die zu einer zunehmenden Anwendung führen (Abb. 18.4.1-2). Schachteln liegen entsprechend dem jeweiligen Verwendungszweck in den verschiedensten Konstruktionen vor. Sie werden dabei als Verbraucher- oder auch Transportverpackungsmittel eingesetzt. Sie besitzen in Abhängigkeit vom eingesetzten Werkstoff Eigensteifigkeit und gute Festigkeitseigenschaften gegen partielle Belastungen. Bei Dichtigkeitsanforderungen sind zusätzliche Maßnahmen, wie Einsatz mehrlagiger, meist siegelfähiger Werkstoffe, Versiegelungsstreifen an Boden und Verschluß u. a., erforderlich. Die Herstellung dichter Schachteln erfolgt dabei hauptsächlich in der Verpackungsmaschine selbst.

Dosen, Becher, Eimer sind Verpackungsmittel mit vorwiegend kreisförmigem Querschnitt und zylindrischem oder kegeligem Hohlkörper (Abb. 18.4.1-3). Die Herstellung des Mantels von Dosen und Eimern geschieht hauptsächlich durch Wickeln von Bogen oder schmalen Kartonbahnen, die des Bechers vor allem durch Formen von gestanzten Zuschnitten (Tafel 75). Die Böden sind eingesetzt und bestehen vorwiegend aus gestanzten Bodenscheiben oder gezogenen Hohlböden. Sie sind durch Kleben, Einrollen, Einbördeln oder mit Verpackungshilfsmitteln am Mantel befestigt. Ein häufig anzutreffender Verschluß von Dosen ist der *Eindrückdeckel* in Verbindung mit einem am Mantel befestigten Klemmring.

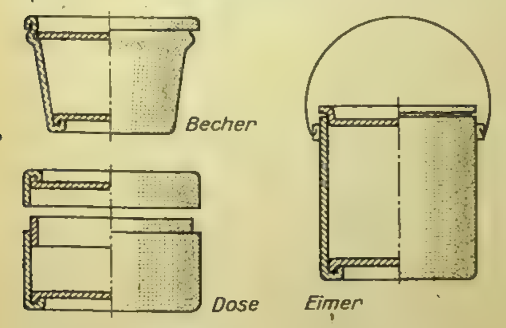


Abb. 18.4.1-3 Grundarten von Verpackungsmitteln mit kreisförmigem Querschnitt

Die Verpackungsmittel haben eine hohe Festigkeit gegen Stoß- und stauchende Belastungen, die abhängig ist von der Anzahl der Wicklungen und dem verwendeten Werkstoff. Die Dichtigkeitseigenschaften werden durch Kaschieren, Beschichten und Imprägnieren den Verpackungsfunktionen und dem Gut angepaßt. Bei Verwendung konischer Hohlkörper ist ein platzsparendes Stapeln möglich.

18.4.2. Glas

Glas eignet sich als Verpackungsmittel, weil es leicht und vielgestaltig verarbeitet werden kann (vgl. 6.3.2.), absolut dicht, geruch- und geschmacklos ist. Neben diesen sehr guten Eigenschaften hat es jedoch eine hohe Eigenmasse und ist sehr bruchempfindlich. Durch geeignete Formgebung und Oberflächenveredlung wird versucht, diese Nachteile des Werkstoffs auszugleichen.

Flaschen. Der Hauptanteil von Glas für Verpackungszwecke wird zur Herstellung von Flaschen verwendet. Neben den unterschiedlichsten Formen gibt es verschiedene Verschlußarten, die ihre Ursache in unterschiedlichen Forderungen hinsichtlich Verpackungstechnologie, Dichtigkeit, Handhabung u. a. haben. Gebräuchliche Verschlußarten sind Korken, Kronenkappen und Schraubverschlüsse.

Weithalsbehälter sind ein sehr häufig eingesetztes Verpackungsmittel zum Verpacken von Lebensmitteln, z. B. Industriekonservengläser. Gebräuchliche Vakuumverschlüsse werden aus Aluminium, Weißblech oder Glas gefertigt.

18.4.3. Metall

In der Verpackungstechnik werden vorrangig Stahl- und Aluminiumblech verwendet. Sie haben sehr gute Verarbeitungs-, hohe Dichtigkeits- und Festigkeitseigenschaften. Aufgrund der Korrosionsempfindlichkeit des Stahls sind meist Korrosionsschutzüberzüge erforderlich.

Weißblech ist beidseitig feuerverzinntes oder auf galvanischem Wege verzinntes Stahlblech.

Schwarzblech ist beidseitig mit Einbrennlacken veredeltes Stahlblech. Neuere Entwicklungen des Oberflächenschutzes basieren auf Bedampfung mit Aluminium oder auf Verchromen.

Als Verpackungswerkstoff wird Metall vorwiegend zur Herstellung von Dosen für Konserven eingesetzt.

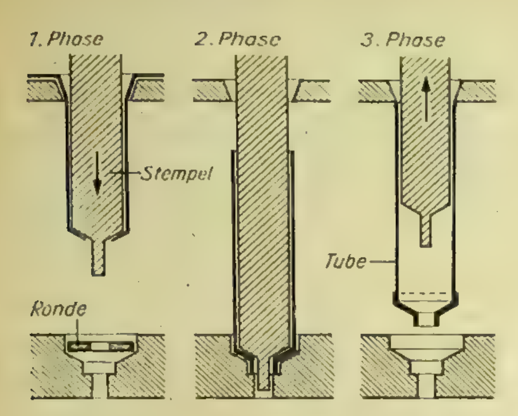


Abb. 18.4.3-1 Fließpressen von Aluminiumtuben

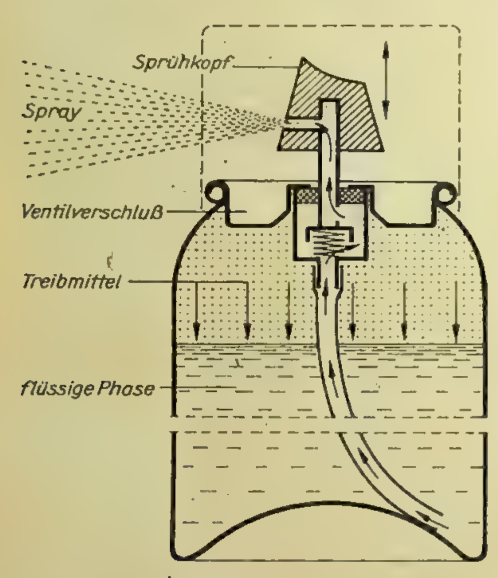


Abb. 18.4.3-2 Aerosoldose

Aluminiumfolie von 0,009 bis 0,02 mm Dicke wird durch Walzen hergestellt. Sie ist lichtundurchlässig, geruchlos und geschmackfrei, allerdings nicht porenfrei. Eine Verbesserung der Dichtigkeits- und Festigkeitseigenschaften wird durch Beschichten mit Plast oder Kaschieren, vorrangig auf Papier, erreicht. Dickere Metallfolien oder -bänder werden zur Herstellung von Eimern, Fässern, Kanistern, Kisten usw. verwendet.

Tuben. Die Herstellung von Tuben und auch Flaschen aus Reinaluminium erfolgt nach dem *Fließpreßverfahren* (Abb. 18.4.3-1). Für die Verpackung saurer oder alkalischer Güter ist jedoch auch hier eine Beschichtung erforderlich. Die Verpackungsmittel sind absolut dicht, gut wiederverschließbar und werden hohen Transportbeanspruchungen gerecht.

Dosen werden überwiegend aus Blechzuschnitten hergestellt. Das Fügen der Verbindungsstellen erfolgt durch Schweißen, Löten oder Falzen. Dosen dienen vorrangig zum Verpacken von Lebensmitteln, die vielfach bei geschlossener Dose einem Sterilisationsprozeß unterzogen werden. In Verbindung mit Treibmitteln und speziellen Ventilverschlüssen werden in zunehmendem Maße Aerosoldosen angewendet (Abb. 18.4.3-2).

18.4.4. Plast

Für die Verpackungsmittelherstellung werden vorrangig *Thermoplaste* eingesetzt. Sie sind zieh-, blas-, spritz-, gieß- und schweißbar. Abfälle können im begrenzten Umfang einer Wiederverarbeitung zugeführt werden. Je nach Wahl der Ausgangsstoffe und der Herstellungsbedingungen (vgl. 5.1.2.) lassen sich die Eigenschaften der Plaste in einem weiten Bereich an die Anforderungen der Verpackungsmittel anpassen. Auch durch die Kombination mit anderen Werkstoffen, z. B. Papier, Metall oder weiteren Plasten, können die Gebrauchswerteigenschaften verbessert werden.

Verpackungsmittel aus Plast werden entweder direkt aus den in Pulver-oder Granulatform vorliegenden Werkstoffen gefertigt, die dazu durch Druck und Temperatur in einen flüssigen oder plastischen Zustand überführt werden, oder indirekt über Plastfolien.

Polyäthylen ist transparent, hat gute Dichtigkeitseigenschaften, ist geschmeidig, kältebeständig und schweißbar. Es wird eingesetzt für Folien, Flaschen, Dosen und Kisten. In zunehmendem Umfang wird Polyäthylen als Schrumpffolie angewendet. Darunter ist eine Folie zu verstehen, die bei der Herstellung gereckt wird und dadurch die Fähigkeit erhält, sich mit Hilfe von Wärme beim Verpackungsprozeß zusammenzuziehen und so das Gut hauteng zu umschließen.

Polyvinylchlorid (PVC). Für Verpackungsmittel wird hauptsächlich PVC-hart, ein Plast ohne Anteile von Weichmachern, eingesetzt. Er ist dicht, hartelastisch und chemikalienbeständig und wird für Folien, Becher, Dosen und Flaschen verwendet.

Polystyrol. Neben der Verwendung als Folie ist besonders der Einsatz als *Schaumpolystyrol* wichtig. Das verschäumte Polystyrol wirkt stoßdämpfend und wärmeisolierend. Es wird für Schachteln oder Einsätze zum Verpacken besonders stoßempfindlicher Güter benutzt.

Polypropylen ist sehr fest, dicht und leicht. Es wird für Folien, Schrumpffolien, Umreifungsband und Kisten eingesetzt.

Folien werden entweder durch Kalandrieren in einem Walzensystem oder durch Strangpressen

hergestellt, wobei der entstehende Schlauch mit Preßluft aufgeblasen und durch Aufschneiden die Folienbahn gewonnen wird (vgl. 5.1.2., Tafel 18).

Flaschen. Plastformlinge werden erwärmt und mit Hilfe von Luft gegen die Wandung einer Form geblasen. Die Formen sind vielgestaltig und meistens mit Schraubverschlüssen versehen. Im begrenzten Umfang werden Flaschen aus Plast direkt in der Verpackungsmaschine aus Folien oder Granulat geformt. Die Füllöffnung wird in diesen Fällen verschweißt. Die Flaschen sind leicht, absolut dicht, bruchfest und sehr beständig.

Beutel werden vorwiegend aus Folien durch Schweißen der Nahtstellen gefertigt. Flachbeutel mit und ohne Seitenfalte werden überwiegend in der Verpackungsmaschine beim Verpackungsprozeß selbst hergestellt. Sie werden zum Verpacken von Lebensmitteln in flüssiger oder pastöser Form und textilen Gütern eingesetzt. Die Beutel besitzen eine begrenzte Dichtigkeit und Festigkeit. Diese Eigenschaften und ihre geringe Standfestigkeit erfordern für viele Verpackungsaufgaben den Übergang zu mehrlagigen Werkstoffen.

18.4.5. Holz

Holz hat gute Verarbeitungseigenschaften. Es ist fest, elastisch und relativ beständig gegen chemische Einwirkungen. Nachteilig wirken die Inhomogenität, das Quellvermögen und der Befall durch Mikroorganismen. Da Holz ein wertvoller Rohstoff ist, wird eine systematische Substitution angestrebt.

In der Verpackungstechnik dient Holz vor allem zur Herstellung von Kisten aus Brettern, die im wesentlichen durch Nagelung oder Haftung mittels Drahtheftklammern zusammengefügt sind.

Vollholzkiste. Die Bretter liegen dicht aneinander und bilden dichte, das Gut von allen Seiten umhüllende Flächen.

Rahmenkiste. Die Wände der Kiste bestehen aus allseitig geschlossenen Rahmen, die mit Füllungen, z. B. aus Faserplatten, versehen sind.

Steige-Haraß. Kiste, deren Wände und Boden mit Zwischenräumen versehen sind, die keinen Deckel hat und durch überstehende Stirnwandleisten stapelbar ist.

18.4.6. Textilien

Rohstoffe des Verpackungswerkstoffs Textilien sind Naturfaserstoffe, z. B. Jute und Baumwolle, sowie Chemiefaserstoffe, z. B. Zelljute oder Folienband aus Polypropylen. Aus den Fasern werden nach den in der Textilindustrie (vgl. 19.3.1.) üblichen Verfahren Gewebe, vorrangig Leinwandbindungen, und Verschließhilfsmittel hergestellt. Gewebe besitzen eine hohe Festigkeit, jedoch geringe Dichtigkeit, die durch Kaschieren mit anderen Werkstoffen, wie Papier und Plastfolie, ausgeglichen werden kann. Gewebe werden hauptsächlich für Säcke eingesetzt, die durch Nähen hergestellt werden.

Flachsack. Er wird aus einer in der Mitte gefalteten und am Boden sowie den Seiten genähten Gewebebahn gefertigt.

Kastensack. Er wird aus einer durchgehenden Gewebebahn und 2 eingenähten Seitenteilen hergestellt.

18.5. Verpackungsmaschinen

Verpackungsmaschinen sind Arbeitsmittel zur Ausführung des Verpackungsprozesses für Güter des Massenbedarfs, d. h. für Erzeugnisse, die in großen Mengen pro Zeiteinheit produziert werden und von denen eine große Zahl von Packungen herzustellen ist (kleiner Packungsinhalt). Güter, die in geringen Stückzahlen hergestellt werden bzw. große Abmessungen aufweisen, werden manuell verpackt.

Auf Verpackungsmaschinen werden Gut und Verpackungsmittel bzw. -werkstoff durch Verpackungsoperationen zur Packung zusammengefaßt. Die jeweilige Ausführungsform einer Verpackungsmaschine ist in starkem Maße abhängig von der zu verpackenden Gutmenge in Packungen pro Zeiteinheit – d. h. vom geforderten Mechanisierungsgrad –, der Art des Gutes und dem verwendeten Verpackungsmittel bzw. -werkstoff. Die verschiedenen Verpackungsmaschinen können dabei auch zu Verpackungslinien verkettet werden (vgl. Abb. 18.5.6-1).

18.5.1. Einteilung der Verpackungsmaschinen

Verpackungsmaschinen werden ausgehend von ihrem Einsatzzweck gegliedert nach
- dem zu verpackenden Gut,
- dem verwendeten Verpackungsmittel,
- der Breite des Einsatzbereichs in Einzweckmaschinen und Mehrzweck-(Universal)-maschinen,
- der Stellung im Verpackungsprozeß,
- den ausgeführten Verpackungsoperationen.

Formmaschinen dienen zur Herstellung von Verpackungsmitteln, wie Flaschen, Dosen, Becher, Schachteln. Aufgrund ihres hohen Spezialisierungsgrads, der hohen Leistung sowie der Anschaffungskosten werden sie z. Z. in geringem Umfang im verpackenden Betrieb eingesetzt und werden vorwiegend beim Verpackungsmittelhersteller angewendet. Formmaschinen wer-

den deshalb auch als *Verpackungsmittelmaschinen* bezeichnet.

Füllmaschinen werden zum Dosieren des Gutes und Füllen von auf Formmaschinen hergestellten Verpackungsmitteln eingesetzt, die einem Speicher entnommen und nach dem Füllen abtransportiert werden.

Verschließmaschinen dienen zum Verschließen gefüllter Verpackungen durch Verpackungshilfsmittel, wie Deckel, Stopfen, Kappen, Klebstreifen, Nähfäden usw., und/oder durch Verformen der zu verschließenden Öffnung, wie Falten, Zusammenpressen, Schweißen.

Füll-Verschließmaschinen. Die sonst auf getrennten Maschinen ausgeführten Verpackungsoperationen „Füllen" und „Verschließen" werden hierbei auf einer Maschine zusammengefaßt (Abb. 18.5.1-1). Die flachliegenden Beutel werden automatisch einem Magazin entnommen und geöffnet. Das Dosieren einer bestimmten Gutmenge (hier Schüttgut) erfolgt nach dem Prinzip der Volumen- oder Waagendosierung. Anschließend werden die gefüllten Beutel wiederum automatisch durch Falten des oberen Beutelendes verschlossen und am Ende der Maschine in geordnetem Verband ausgeschoben. Dieser Packungsverband kann unmittelbar einer Maschine zum Herstellen von Transportpackungen zugeführt werden.

Form-Füll-Verschließmaschinen verwirklichen die Verpackungsoperationen Formen, Füllen und Verschließen des Verpackungsmittels in einer Maschine (Abb. 18.5.1-2). Bei der gezeigten Maschine werden 2 Verpackungswerkstoffbahnen durch Zuführzangen oder -walzen und mittels Messer in Abschnitte getrennt. Das Gut wird durch eine Vibrationsförderrinne zugeführt

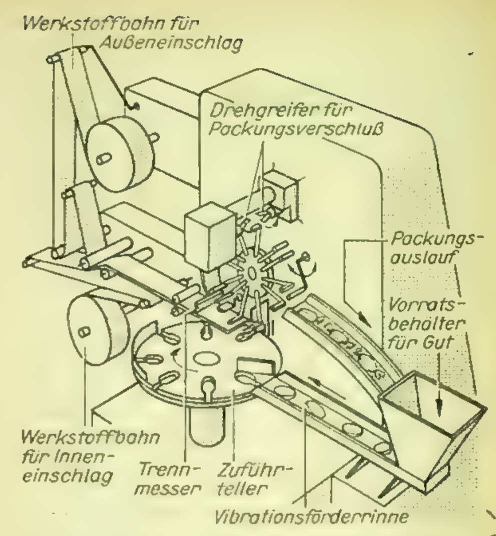


Abb. 18.5.1-2 Einschlagmaschine für beiderseitigen Dreheinschlag

und auf einem Teller mit Aussparungen in der Form des Gutes vereinzelt. Gut und Verpackungswerkstoff werden vereinigt, und durch Falten des Papiers wird die Verpackung geformt. Das Verschließen erfolgt durch Verdrillen der Papierenden. Anstelle des Dreheinschlags kann bei Einbau anderer Faltorgane ein Falteinschlag hergestellt werden. Voraussetzung hierzu ist, daß das Gut ebene Stirnseiten hat (Tafel 76).

Dosierungsprinzipe. Maßgeblichen Einfluß auf die Anwendbarkeit der Verpackungsmaschinen für verschiedene Gutarten hat die Dosierung des Gutes, d. h. das Abzählen nach Stück oder das Abteilen nach Masse bzw. Volumen.

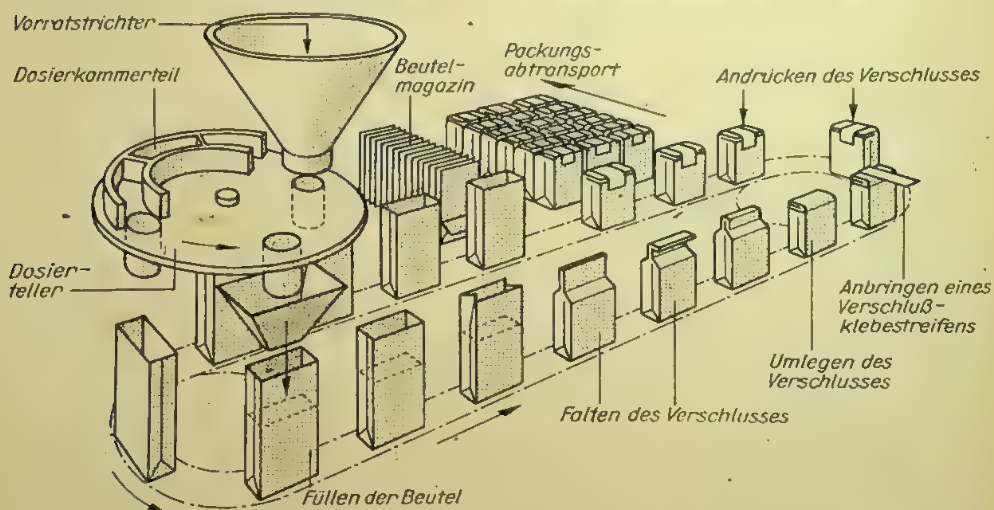


Abb. 18.5.1-1 Füll-Verschließmaschine für Bodenbeutel

Stückdosierung wird für Stückgüter angewendet, die einzeln oder in einer definierten Stückzahl zu verpacken sind. Das Abzählen kann manuell oder mechanisch erfolgen. Bei mechanisierter Ausführung wird – meist nach entsprechenden Ordnungsvorgängen – jeweils aus einer über Kanäle, Bänder usw. geordnet zugeführten Menge ein Einzelstück oder eine bestimmte Stückzahl durch Schieber abgeteilt und dem Verpackungsmittel zugeführt.

Massedosierung erfolgt auf mechanischen Waagen, die meist durch Elektromagnete gesteuert werden. Sie wird in erster Linie für schüttbare Güter angewendet, weist eine hohe Genauigkeit auf, hat jedoch im Vergleich zu anderen Dosierverfahren eine niedrige Leistung (bis ≈ 30 Wägungen/min), so daß auf hochproduktiven Verpackungsmaschinen oft mehrere Waagen montiert sind. Einen Sonderfall der Massedosierung stellt das Preisauszeichnen bereits verpackter Stückgüter, wie Schnittwurst, Schnittkäse, Geflügel, Fleisch, Fisch und Obst, dar. Hier handelt es sich um das nachträgliche Ermitteln der Masse für Güter, bei denen das Abteilen nach Stückzahl relativ große Masseschwankungen ergibt. Bei mechanisierter Ausführung dieses Prozesses wird eine Waage mit einem Rechenwerk und einer Druckeinheit gekoppelt. Diese Einheit stößt ein auf die Packung aufzuklebendes Etikett mit Angaben über Masse, Erzeugnisart, Preis und – bei verderblichen Gütern – Herstellungsdatum aus.

Volumendosierung wird für Schüttgüter, pastöse Güter und Flüssigkeiten angewendet. Voraussetzung für genaues Dosieren ist hierbei eine gleichbleibende Dichte des Gutes, da das Abteilen der zu verpackenden Gutmenge in einem Meßgefäß mit definiertem Volumen erfolgt. Veränderungen in der Dichte eines Gutes treten vor allem bei Naturprodukten häufig auf. Sie müssen durch Volumenänderungen am Meßgefäß manuell oder durch mechanisierte Stelleinrichtung ausgeglichen werden.

Für die einzelnen Gutgruppen werden innerhalb der Volumendosierung unterschiedliche Prinzipe verwendet, z. B. für
Schüttgut: Kammer-, Kolben-, Schneckendosierung,
pastöses Gut: Kolben-, Schneckendosierung,
flüssiges Gut: Maß-, Höhenfüllung.

18.5.2. Verpackungsmaschinen für Verbraucherpackungen

Sie dienen zum Verpacken von Gütern in verbrauchergerechte Einheiten. Die Zahl unterschiedlicher Maschinentypen ist bei dieser Maschinenkategorie besonders groß (über 2000). Typische Verpackungsmittel für diesen Prozeßabschnitt sind: Einschlag, Beutel, Schachtel, tiefgezogene Verpackung, Flasche, Dose, Tube (Tafel 75, 76).

18.5.3. Verpackungsmaschinen für Transportpackungen

Mit diesen Maschinen werden die Verbraucherpackungen oder auch die noch unverpackten Güter in Transportpackungen zusammengefaßt. Es werden sowohl Einzelstück- als auch Mehrstückpackungen hergestellt.

Typische Verpackungsmittel für diesen Prozeßabschnitt sind: Einschlag aus Papier oder Schrumpffolie, Schachtel, Sack, Flaschenkasten. Die Verbraucherpackungen werden meist maschinell zu einem Verband geordnet (vgl. Abb. 18.5.1-1) und in die geöffnete Schachtel geschoben. Bei anderen Maschinen erfolgt das Schachtelfüllen auch in senkrechter Richtung, z. B. beim Verpacken von Flaschen oder Dosen.

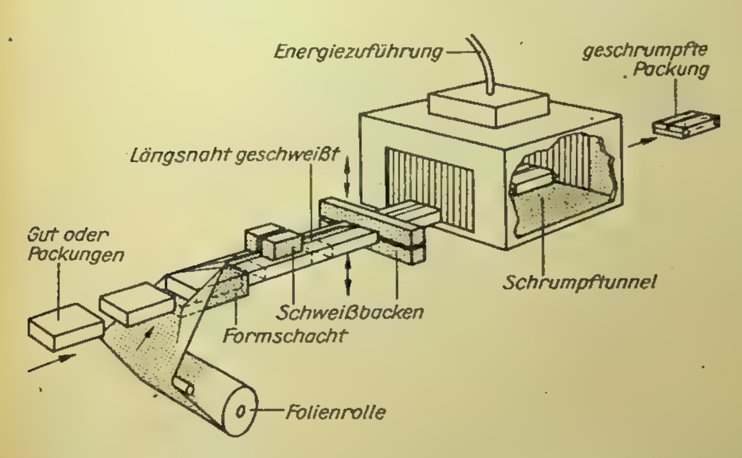


Abb. 18.5.3-1 Form-Füll-Verschließmaschine für Schrumpffolieneinschlag

Die Schachteln werden manuell geöffnet und in den Schachtelhalter der Maschine eingelegt. Die gefüllte Schachtel wird durch den Schachtelhalter in Transportstellung geschwenkt und danach zur nächsten Arbeitsstation (Schachtel-Verschließmaschine) geführt.

Bei Maschinen für das Verpacken in Schrumpffolie nutzt man die besondere Eigenschaft von Plastfolien, beim Erwärmen zu „schrumpfen" und sich dadurch eng um das zu verpackende Gut zu legen (vgl. 18.4.4.). In der Verpackungsmaschine werden Verbraucherpackungen oder unverpackte Güter mit Folie umhüllt und diese Umhüllung durch Plastschweißen verschlossen. Die Packung durchläuft anschließend einen Schrumpftunnel, in dem die Folienhülle durch Heißluft (Gebläse) oder durch Heizstrahler mit Temperaturen zwischen 110 und 240 °C erwärmt wird und sich dabei zusammenzieht (Tafel 76). Dem Schrumpftunnel ist meist ein Kühlgebläse nachgeschaltet, das die Folie rasch abkühlt und damit diesen Spannungszustand fixiert (Abb. 18.5.3-1).

18.5.4. Maschinen für das Bilden von Ladeeinheiten

Sie dienen zum Zusammenfassen von unverpackten Gütern oder Transportpackungen zu Gebinden, die sich bei Transport und Umschlag mit geringstem Zeitaufwand manipulieren lassen.

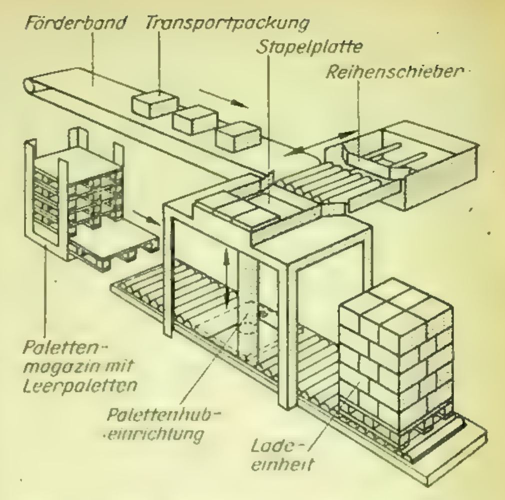


Abb. 18.5.4-1 Palettiermaschine

Die verwendeten Hilfsmittel, auf denen Ladeeinheiten gebildet werden, nehmen eine Zwischenstellung zwischen Verpackungs- und Transporttechnik ein. Sie werden vielfach als *Transporthilfsmittel* bezeichnet.

Typisches Hilfsmittel für die mechanisierte Herstellung von Ladeeinheiten ist die *Flachpalette*. Mit *Boxpaletten*, *Behältern* und *Containern* werden Ladeeinheiten manuell bzw. mit Gabelstapler gebildet (vgl. 10.6.2.).

Güter oder Packungen mit geringer Standfestigkeit bzw. sehr glatter Oberfläche, die bei Stape-

Abb. 18.5.6-1 Füllmaschine für Schachteln

lung auf Flachpaletten zum Abrutschen neigen und ein Auseinanderfallen des Stapels verursachen können, müssen auf der Palette zusätzlich gesichert werden. Das wird erreicht durch *Umreifen* mit Stahl- oder Plastband, *Umhüllen* mit Schrumpffolie oder Aufbringen eines *Haftmittels* (Kleber) auf die Stapelflächen.
Transportpackungen (vgl. Abb. 18.5.3-1) werden häufig durch Palettieren zu Ladeeinheiten zusammengefaßt. Bei vollmechanisierten Anlagen erfolgt das Zuführen der Packungen sowie der leeren Paletten und das Ordnen der Packungen zum jeweiligen Stapelbild maschinell. In Abb. 18.5.4-1 werden Transportpackungen über ein Förderband zugeführt und durch den Reihenschieber auf der Stapelpalette angeordnet. Eine leere Palette wird aus dem Palettenmagazin ausgeschoben und durch die Hubeinrichtung unmittelbar unter die Stapelplatte gehoben. Sobald die Stapelpalette mit Packungen gefüllt ist, wird sie zurückgezogen und damit die Packungsschicht auf der Palette abgesetzt. Die Hubeinrichtung senkt sich nach jeder Packungsschicht um die Höhe der Transportpackungen ab. Die Fördereinrichtungen für die Packungen erlauben durch eingebaute Weichen oder Schieber auch das Drehen der Packungen um 90°, so daß eine versetzte Stapelung und damit ein stabilerer Stapelverband erreicht wird.

18.5.5. Verpackungshilfsmaschinen

Mit diesen Maschinen werden zusätzliche Arbeitsgänge an Gut, Verpackungsmittel und/oder Packung ausgeführt.
Etikettiermaschinen kennzeichen die Packung durch Aufbringen entsprechender Etiketten.
Evakuiereinrichtungen saugen die Luft aus gefüllten Packungen und verschließen die Packung. Es ist ein Vakuum bis 98 % erreichbar. Das Evakuieren dient zum Schutz des Gutes gegen schnellen Verderb; es setzt gasdichte Verpackungswerkstoffe voraus.
Begasungseinrichtungen sind häufig Evakuiereinrichtungen nachgeschaltet. Sie bringen zum Schutz gegen Verderb des Gutes Schutzgas in die vorher evakuierte Packung ein und verschließen sie.
Schrumpfeinrichtungen für das Schrumpfen von Plastfolie vgl. 18.5.4.
Verschnürmaschinen dienen zum Umschnüren von unverpacktem oder verpacktem Gut.
Klebstreifengeber werden für das Sichern von gefalteten Verschlüssen, z. B. bei Schachteln oder Einschlägen, und/oder zum Kennzeichnen des Packungsinhalts eingesetzt.
Kontrollwaagen zur Prüfung des Füllgewichtes von Packungen und zum Nachstellen der Dosiereinrichtung vgl. 18.5.1.
Kombinierte Wäge- und Preisauszeichnungsmaschinen vgl. 18.5.1.

18.5.6. Verkettung von Verpackungsmaschinen zu Verpackungslinien

Die räumliche Verbindung von Verpackungsmaschinen mit Hilfe von Fördereinrichtungen wird als *Verpackungslinie* bezeichnet. Verpakkungslinien bestehen aus mindestens 2 miteinander verketteten Maschinen. Sie können zur Realisierung des gesamten Verpackungsprozesses (Herstellen von Verbraucherpackung, Transportpackung und Ladeeinheit) oder einzelner Prozeßabschnitte (z. B. Herstellen der Verbraucherpackung) durch Zusammenschaltung von Einzelmaschinen unter Einbeziehung von Verpackungshilfsmaschinen verkettet werden (Abb. 18.5.6-1).
Die Verkettung kann mit genauer zeitlicher und mengenmäßiger Anpassung an den Arbeitsrhythmus der Maschine (*starre Verkettung*) oder unter Zwischenschaltung von Speichern, sog. Pufferstationen, bei mengenmäßiger Anpassung der verketteten Einzelmaschinen (*lose Verkettung*) erfolgen. Bei der Verkettung und Einstellung der Maschinenleistungen sind mögliche Maschinenstillstände zu berücksichtigen.

19. Textil- und Bekleidungstechnik

Das Wort „textilis“ ist lateinischen Ursprungs und bedeutet „auf Gewebe bezüglich“. Heute umfaßt der Begriff Textiltechnik alle Arbeitsgänge, technischen Mittel und Verfahren von der Verarbeitung der Faserstoffe bis zum konfektionsfähigen textilen Erzeugnis.

19.1. Textile Faserstoffe

Textiler Faserstoff besteht aus längenbegrenzten (Fasern) oder nicht längenbegrenzten (Elementarfäden) schmiegsamen Gebilden mit dem gemeinsamen Kennzeichen einer im Vergleich zu den Abmessungen der Querschnittfläche großen Länge, die textil verarbeitbar sind. Hierzu können auch Gummifäden, Drähte, Metallfasern, Bast, Streifen (z. B. Papierstreifen) u. a. zählen, wenn sie textil verarbeitet werden.
Es wird grundsätzlich zwischen Natur- und Chemiefaserstoffen unterschieden. Zu ersteren gehören pflanzliche, tierische und mineralische Faserstoffe. Chemiefaserstoffe werden nach verschiedenen chemisch-technischen Verfahren aus natürlichen oder synthetischen Hochpolymeren oder aus anorganischen Stoffen hergestellt.
Der ständig wachsende Bedarf an Faserstoffen kann weder quantitativ noch qualitativ durch Naturfaserstoffe, sondern nur durch Erhöhung des Chemiefaserstoffaufkommens, das gegenwärtig bei ≈ 40 % liegt, abgedeckt werden. Unter den Chemiefaserstoffen werden die Zellulose-, Polyester-, Polyamid- und Polyakrylnitrilfaserstoffe, ergänzt durch Polyolefin- und Glasfaserstoffe, ihre dominierende Stellung für die Dauer dieses Jahrhunderts behalten.

19.1.1. Naturfaserstoffe

Pflanzenfasern. ***Samenfasern*** umhüllen als Samenhaar die Samenkerne der Pflanzen.
Die *Baumwollpflanze* ist eine einjährige, baumartige, 1 bis 6 m hohe Malvenpflanze. Sie wird vor allem in der UdSSR, den USA, der ARÄ, VR China, in Indien, Mittel- und im nördlichen Südamerika angebaut. Zum Anbau sind 6 bis 7 Monate warmes oder heißes Wetter und gleichmäßige hohe Feuchtigkeit nötig. Die reifen Samenkapseln platzen auf, der Samen quillt heraus. Sofort nach der Kapselöffnung wird geerntet. Zur Nachreife lagert die geerntete Samenbaumwolle ≈ 30 Tage, anschließend erfolgt das Ablösen der Samenfasern vom Samenkern, das *Egrenieren*. Die *Linters* (Faserlänge < 10 mm) werden nicht versponnen, sondern vornehmlich zur Herstellung von Zellulosechemiefaserstoffen und Schichtpreßstoff verwendet.
Nach dem Egrenieren folgen *Klassifizieren* (Qualitätseinstufung) und *Ballenpressen* (200 bis 300 kg je Ballen). Die Baumwollfaser ist von gelblichweißer Farbe, mattglänzend. Ihre Oberfläche zeigt korkenzieherartige Windungen, die Faserlänge liegt zwischen 10 und 55 mm. Baumwolle hat ein gutes Farbaufnahmevermögen, besonders nach der Merzerisation (vgl. 19.4.1.). Sie eignet sich von allen Faserstoffen am besten zum Verspinnen. Über die Hälfte aller Textilien wird aus Baumwolle hergestellt.
Stengelfasern werden als Bündel (technische Fasern) aus den Stengeln von Flachs, Hanf, Jute, Ramie u. a. gewonnen.
Flachs wird aus der in ganz Europa, Nord- und z. T. Südamerika angebauten einjährigen Flachspflanze (Lein) hergestellt. Die ≈ 80 cm hohen Stengel werden bei Gelbreife gerauft, die Fasern aus den Stengeln durch *Rösten* gewonnen. Hierbei legt man das Flachsstroh mehrere Wochen auf Wiesen aus (*Tauröste*) oder tagelang in Wasser (*Kalt-* bzw. *Warmwasserröste*). Dadurch werden die Pektine in den Stengeln einem Gärungsprozeß unterworfen, damit sich die Fasern leichter gewinnen lassen. Die getrockneten Stengel werden geknickt und die Holzteile durch *Schwingen* mit der Hand oder mittels *Schwingturbine* entfernt. Flachs ist grau oder goldgelb und sehr fest. Die technische Faser (40 bis 80 cm) besteht aus durchschnittlich 5 cm langen Einzelfasern, die durch Pektine zusammengehalten werden. Flachsfasern zählen zu den reißfestesten Faserstoffen. Sie haben eine glatte Oberfläche und seidenartigen Glanz, besitzen gutes Wasseraufnahmevermögen und gute Wär-

meleitfähigkeit. Aus Flachs werden besonders Bett- und Tischwäsche, Handtücher, Planen u. ä. hergestellt.

Hanf wird vor allem noch in der UdSSR, Italien, der Ungarischen VR, SR Rumänien, VR Bulgarien, SFR Jugoslawien und der Türkei zur Fasergewinnung angebaut. Die Gewinnung aus der 2 bis 5 m hohen Pflanze ist ähnlich wie beim Flachs. Hanf ist hellgelb bis graugelblich, grob, reißfest und besonders widerstandsfähig gegen Nässe. Man stellt daraus Bindfäden, Tauwerk, Schnüre und feine Seilerwaren, aber auch Bett- und Tischwäsche her.

Jute ist die Stengelfaser eines einjährigen Lindengewächses, das 1,5 bis 5 m hoch wird. 90% der Welternte an Jute werden durch Indien und Pakistan erbracht. Weitere Anbaugebiete befinden sich in Brasilien, der VR China, in Burma, Nepal, Japan. Die Gewinnung der Faser geschieht durch Wasserröste ähnlich wie bei Flachs. Jute hat gelblichweiße bis silbrige, teilweise auch rötliche Farbe. Aus Jute werden Garne im Bereich von ≈ 160 bis 1,6 tex erzeugt, die zu Sackgeweben, Wandbespannungen, Polster„leinen" und vor allem zu Grundware für Fußbodenbelag (z. B. für Tuftingteppich) verarbeitet werden. In Europa werden heute meist nur noch Gewebe in großen Breiten für solche Grundwaren hergestellt.

Ramie ist die Bastfaser einer im subtropischen Klima (VR China, Indonesien, Indien) als Wurzelschößlinge angebauten mehrjährigen Nesselart. Ramiegarne zeichnen sich durch hohe Reißfestigkeit, auffallend schönen Glanz und sehr gute Saugfähigkeit aus und sind von hellbeiger Farbe. Sie werden meist zu Tisch- und Bettwäsche, aber auch zu Zwirnen und Netzen verarbeitet. Ramie spielt auf dem Weltmarkt trotz einer Jahreserzeugung von 10^5 t keine Bedeutung, da die Fasern fast ausschließlich in den Erzeugerländern verwendet werden.

Blattfasern sind gröbere Fasern (Leit- und Stützgefäße) aus den Blättern tropischer und subtropischer Pflanzen. Die Fasern werden ausschließlich durch mechanische Bearbeitung der Blätter gewonnen.

Abakafaser, nach dem Ausfuhrhafen Manila auch als *Manilafaser* bezeichnet, wird aus den Blattscheiden (Scheinstämmen) der Faserbanane gewonnen, die man als Wurzelschößlinge auf den Philippinen, seit kurzem auch in Mittelamerika anbaut. Im Zeitabstand von einigen Monaten werden 2 bis 5 m lange Blätter abgeschlagen. Nach meist maschinellem Abschaben des Blattfleisches trocknet man die bloßgelegten Faserbündel und exportiert sie zur Weiterverarbeitung. Abaka ist die festeste Pflanzenfaser, von gelber bis rotbräunlicher Farbe, steif sowie seewasser- und fäulnisbeständig, weshalb sie besonders für Schiffstauwerk und Seilerwaren verwendet wird.

Agavefasern werden aus den Blättern der Agavepflanzen gewonnen, von denen die in Ostafrika, Mexiko, Kuba, Brasilien und Indonesien angebaute mehrjährige *Sisalagave* die größte Bedeutung hat. Sie hat bis zu 250 längliche, fleischige Blätter. Das wasserreiche Blattfleisch wird auf Entfaserungsmaschinen entfernt und der Faserstrang getrocknet. Sisal ist eine weiße, sehr feste, bis 2 m lange, witterungsbeständige Faser, aus der vor allem Seilerwaren (Erntebindegarn) hergestellt werden.

Kokosfaser ist eine Fruchtfaser, die als dicke, faserige Mantelschicht die Kokosnuß umhüllt. Nach deren Spalten werden die Schalenhälften in Wasser gelegt und die Fasern abgeschabt. Eine Nuß liefert ≈ 100 g 30 cm lange Spinnfasern und 40 g kurze Fasern für Bürsten. Sie sind rotbraun, sehr fest, aber spröde und widerstandsfähig gegen mechanische Beanspruchung (Scheuern). Die langen Fasern werden meist im Erzeugerland von Hand zu Garnen versponnen und fast ausschließlich zu Läufern, Fußabstreichern und Matten verarbeitet.

Tierische Faserstoffe. *Wolle* und *Haare*. ***Wolle*** nennt man die feinen, mehr oder weniger wellenförmig gekräuselten und filzfähigen Fasern von Schafen, Mohairziegen, Lamas, Alpaka, Vikunja, Kamelen und Angorakaninchen. *Haare* sind dagegen nicht gekräuselte, meist gröbere Fasern, z. B. von Hausziegen, Kaninchen, Pferden.

Schafwolle gibt es entsprechend den verschiedenen Hausschafrassen in unterschiedlicher Form. *Merino* ist eine feine, stark gekräuselte Wolle mit 50 bis 80 mm Faserlänge, *Cheviot* eine längere, schlichte, ungelockte Wolle bis zu 330 mm Faserlänge. *Crossbred* (Kreuzzucht von weiblichen Merinos mit grobhaarigen Cheviotschafen) nennt man die mittellange (120 bis 250 mm) und mittelkräftige Wolle, die heute den Markt beherrscht. Die bedeutendsten Schafzuchtländer sind Australien, UdSSR, VR China, Neuseeland, Argentinien, Indien, Südafrika, Großbritannien und die USA.

Die Wolle wird durch *Scheren*, bei toten Tieren durch *Raufen* gewonnen. Eine Schur ergibt 2 bis 7 kg Wolle; es wird ein- bis zweimal jährlich geschoren. Man unterscheidet *Flaum-(Unter-) Haare*, die fein und markfrei sind und für Streichgarn verwendet werden, *Grannen-(Ober-) Haare*, die gröber, steifer und länger sind und zu Kammgarn verarbeitet werden, außerdem Stichelhaare und Borsten. Die Klassifizierung geht von AAAAA (feinste Wollen), AAAA, AAA, AA, A, B, C, D, E bis F (gröbste Wollen). Am meisten verwendet man die Klassen AAA bis D; die Klassen A und B sind hauptsächlich Merino-Wolle, die Klassen C und D Crossbred-Wolle.

Nach dem Produktionszweck unterteilt man in Kamm-, Streich-, Halbkammwolle und Kämmlinge.

Schafwollen sind rassenbedingt weiß bis gelblich, seltener braun bis schwarz; durch ihre Schuppenstruktur und starke Kräuselung haben sie eine geringe Lichtreflexion und ein gutes Wärmerückhaltevermögen. Durch ihre guten Dehnungs- und Elastizitätswerte zeigen Wollstoffe eine geringe Knitterneigung. Wolle ist die einzige filzfähige Faser und zeigt die höchste Wasseraufnahmefähigkeit aller textilen Faserstoffe.

Ziegenhaare sind die gut verspinnbaren Flaumhaare der Hausziege. *Mohairwolle* stammt von der Mohair- oder Angoraziege, die in Kleinasien, im Süden der UdSSR, in Australien, Südafrika, Spanien und Frankreich gezüchtet wird und 100 bis 200 mm lange, feine, weiche, seidenglänzende Fasern liefert.

Kaschmirwolle wird durch *Auskämmen* oder *Ausraufen* von der Kaschmirziege (Tibet) gewonnen. Die wertvollen weichen, glänzenden Fasern sind ≈ 30 bis 40 mm lang.

Kamelhaare besitzen eine hell- bis dunkelbraune Farbe und sind die im Frühjahr ausfallenden gesammelten Haarbüschel der Kamele. Der jährliche Betrag eines Tieres liegt bei 3 bis 4 kg. Aus Kamelhaar gefertigte Textilien filzen und knittern kaum und haben eine lange Haltbarkeit.

Roßhaare heißen die 25 bis 80 cm langen Schweif- und Mähnenhaare von Pferden, die zu Garnen für Einlagestoffe verarbeitet werden.

Raupenfaserstoffe sind bereits fertige Fäden von großer Länge, Feinheit und Festigkeit.

Bombyxseide (*echte Seide*) ist hellgelblich, sehr glänzend, sehr fest und sehr elastisch. Sie wird zu Kleider-, Wäsche-, Dekorationsstoffen, Fallschirmseide, technischem Gewebe, Näh- und Stickfäden verarbeitet. Neben dem Bombyx mori sind noch andere Schmetterlingsraupen seidenerzeugend, z. B. der wildlebende Tussahspinner (Indien, China, Japan), dessen Kokons sich gut abhaspeln lassen; sie wird wie Bombyxseide verwendet.

Mineralfasern. Die wichtigste in der Natur vorkommende Mineralfaser ist der *Asbest*, ein Magnesiumsilikat, das durch Verwitterung des Serpentingesteins entsteht und besonders in Kanada, Südafrika, Sibirien und Italien vorkommt. Die graugrünlichen, hitze-, säure- und alkalibeständigen Fasern werden für Schutzkleidung, Theaterdekorationen, Dichtungen, Bremsbeläge (mit Drahteinlage), Asbestbeton, Leichtbauplatten, Feuerschutzbeläge u. a. verwendet.

19.1.2. Chemiefaserstoffe

Zellulosechemiefaserstoffe. Die Ausgangsprodukte zur Herstellung der Zellulosechemiefaserstoffe sind natürliche Polymere pflanzlicher Herkunft.

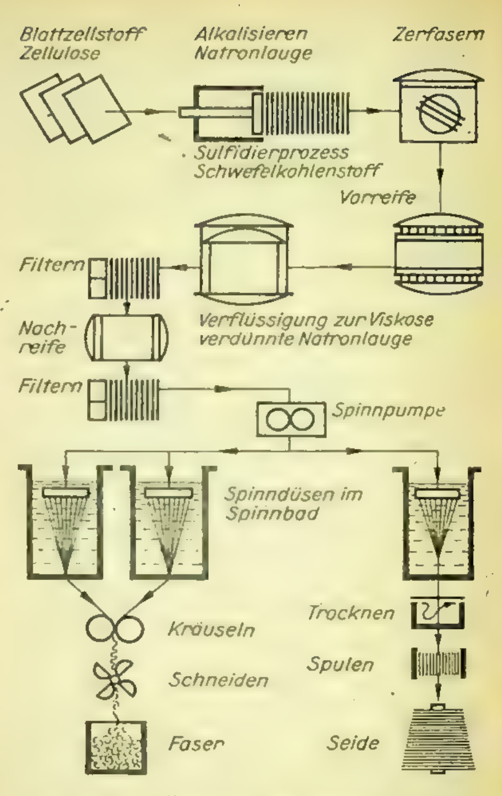


Abb. 19.1.2-1 Übersicht der Herstellungsverfahren von Viskosefaserstoffen

Viskosefaserstoffe sind Fasern und Seiden, die nach dem Viskoseverfahren aus Zellstoff (vgl. 4.10.2.) hergestellt werden (Abb. 19.1.2-1). Durch modifizierte Erspinnverfahren werden Viskosefaserstoffe mit einem hohen Naßmodul erzielt, sog. *Modalfaserstoffe*. Dazu zählen *Polynosefaserstoffe*, die sich durch hohe Festigkeit im nassen Zustand, gute Weichheit und Fülligkeit und hohe Formbeständigkeit auszeichnen, und *HWM-Faserstoffe* (engl. high wet modulus = hoher Naßmodul), die einen hohen Naßmodul, bessere Biege- und Scheuerbeständigkeit und höhere Dehnungs- und Elastizitätswerte als die normalen Viskosefaserstoffe aufweisen. Viskosefaserstoffe werden rein oder in Mischung mit Baumwolle, Wolle oder Synthesefaserstoffen versponnen. Viskoseseide und -fasern haben in der DDR den gemeinsamen Handelsnamen „Regan®".

Kuoxamfaserstoffe werden aus Zellulose, die in Tetramminkupfer(II)-hydroxidlösung (Kupferoxidammoniak) gelöst wurde, versponnen. Das Ausgangsmaterial bilden Baumwollinters oder Zellstoff. Kuoxamseide hat naturseidenähnlichen Glanz und Griff und ist hochwertiger und teurer als Viskoseseide. Kuoxamfaserstoffe

werden nur noch in geringem Umfang hergestellt und verarbeitet.
Azetatfaserstoffe werden aus Zelluloseazetat (Azetylzellulose) ersponnen, sind nur mit besonderen Farbstoffen anfärbbar und wenig quellbar; sie ähneln jedoch sehr stark der Bombyxseide. Sie werden für viele Bekleidungszwecke, besonders für festliche Bekleidung, und Haushalttextilien verwendet.
Synthesefaserstoffe. Die fadenbildenden Makromoleküle werden durch Polymerisation, -kondensation oder -addition (vgl. 4.10.1.) aus den geeigneten Monomeren hergestellt.
Polyvinylchlorid war der erste synthetisch hergestellte Faserstoff (Pionierpatent der synthetischen Faserstoffe 1913, Erfinder *F. Klatte*). Polyvinylchloridfaserstoffe werden heute vor allem durch Polymerisation aus nachchloriertem Polyvinylchlorid hergestellt, z. B. „PIVIACID®", und nach dem Naßspinnverfahren (vgl. 4.10.5.) in die Fadenform gebracht. Sie sind absolut unbrennbar, beständig gegenüber Säuren und Laugen, aber empfindlich gegenüber organischen Lösungsmitteln (Vorsicht bei chemischer Reinigung!). Sie zeigen ein ausgezeichnetes elektrisches Isoliervermögen und hohe elektrostatische Aufladung. PIVIACID-Erzeugnisse sind verrottungsfest, haben ein hohes Wärmerückhaltevermögen, aber nur geringe Temperaturbeständigkeit (60 bis 70 °C Erweichungsbereich). Die wichtigsten Einsatzgebiete sind: Vliesstoffe für Kleidungs- und technische Zwecke, Polster-, Schallschluck- und Isoliermaterial, nicht entflammbare Raumtextilien, Filter,

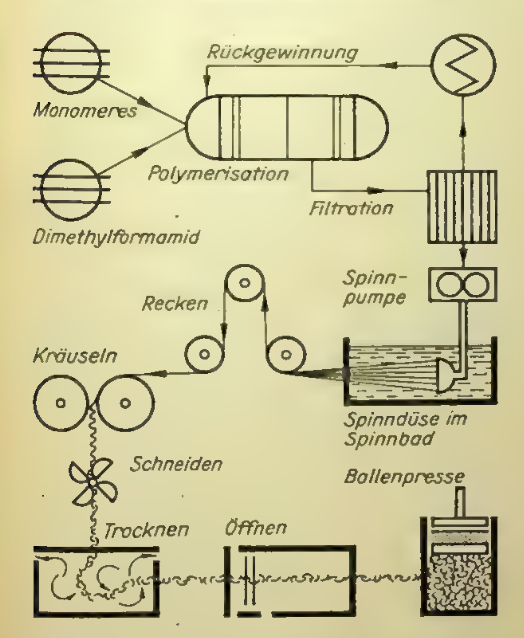


Abb. 19.1.2-2 Herstellungsverfahren Wolpryla 65

Füllmaterial für Steppdecken, Pelz- und Lederimitationen, Rheumawäsche und -decken.
Polyakrylnitrilfaserstoffe werden seit 1950 großtechnisch hergestellt. Das polymere Polyakrylnitril wird in einem geeigneten Lösungsmittel, meist Dimethylformamid, gelöst und nach dem Naß- oder Trockenspinnverfahren (vgl. 4.10.5.) in die Fadenform gebracht (Abb. 19.1.2-2). Polyakrylnitrilfaserstoffe („WOLPRYLA®") zeichnen sich durch hervorragende Licht- und Wetterbeständigkeit, gute Formbeständigkeit, hohes Wärmerückhaltevermögen, niedrige Dichte und als Faser durch starke Bauschkraft und wollähnlichen Griff aus. Die Verarbeitung der Fasern kann nach allen konventionellen und auch verkürzten Spinnverfahren (vgl. 19.2.) sowohl rein als auch in Mischungen mit Naturfaserstoffen bzw. anderen Chemiefaserstoffen erfolgen. Eingesetzt werden Polyakrylnitrilfaserstoffe rein oder in Mischung für Ober- und Unterbekleidung, im Haushalt und für Raumtextilien, bei Sport- und Campingartikeln und in der Technik.
Polyvinylalkoholfaserstoffe sind wasserlöslich. Um den Faserstoff kochfest zu machen, werden einige OH-Gruppen vernetzt. In der wasserlöslichen Form werden sie als Bindfaden und chirurgisches Nähmaterial eingesetzt. In der wasserunlöslichen Form haben sie ein hohes Feuchtigkeitsaufnahmevermögen und werden daher für Unterbekleidung und Strumpfwaren verwendet. Durch ihre Fäulnis- und Seewasserbeständigkeit eignen sie sich für Fischernetze und Filtertücher.
Polyamidfaserstoffe können auf der Basis von Aminokarbonsäuren (z. B. PA 11), Laktam (z. B. PA 6, „DEDERON®") oder Diaminen und Dikarbonsäuren (z. B. PA 6.6., „NYLON") hergestellt werden (vgl. 4.10.5.) Die Fadenbildung aus den Polymeren erfolgt über Schmelzspinnverfahren (vgl. 4.10.5.). Die Vorteile der Polyamidfaserstoffe liegen in der hohen Reißfestigkeit, der hervorragenden Scheuer- und Biegebeständigkeit, der hohen Elastizität und guten Anfärbbarkeit. In der Fertigware sind Polyamide leicht zu waschen und zu trocknen. Als Nachteile sind aber eine starke elektrostatische Aufladung und eine damit verbundene Schmutz- und Fettaffinität sowie eine mäßige Temperaturbeständigkeit und geringe Wasseraufnahme zu nennen.
Neuentwickelte aromatische Polyamide zeigen hohe Feuchtigkeitsaufnahme und gute Temperaturbeständigkeit (bei ≈ 500 °C 20 % Festigkeitsabfall!). Polyamidfaserstoffe können sowohl als Seide als auch als Faser rein oder in Mischungen versponnen für fast alle textilen Erzeugnisse eingesetzt werden.
Polyesterfaserstoffe werden seit 1953 großtechnisch hergestellt (vgl. 4.10.5.). Die faserbilden-

den Polyester entstehen durch eine Polykondensationsreaktion aus Terephthalsäure und Äthandiol. Die Fadenbildung erfolgt nach dem Schmelzspinnverfahren. Sie weisen von allen Synthesefaserstoffen die höchste Reißfestigkeit bei guter Elastizität auf. Sie sind sprungelastisch, knitterarm und ausgezeichnet formbeständig. Ihre Feuchtigkeitsaufnahme ist gering, die Licht- und Wetterbeständigkeit sowie die thermische Beständigkeit sind gut. Textile Erzeugnisse aus Polyester sind pflegeleicht. Allerdings weisen sie ungünstige Anfärbebedingungen im Vergleich zu anderen Faserstoffen auf. Polyesterseiden und -fasern eignen sich sehr gut für Oberbekleidung, Gardinen und technische Textilien.

Polyolefinfaserstoffe (*Polyäthylen-* und *Polypropylenfaserstoffe*) werden vornehmlich für technische Zwecke, z. B. Säcke, Planen, Seilerwaren, Kabelumspinnungen usw., eingesetzt. Aufgrund ihrer niedrigen Dichte ($\approx 0{,}95$ g/cm^3) finden sie bei Seenotartikeln, Wurf- und Rettungsleinen und für Fischernetze Verwendung. Polyolefinfaserstoffe sind fest und chemikalienbeständig, haben aber einen niedrigen Schmelzpunkt und hohe elektrostatische Aufladung. Für die Konfektion werden sie nur vereinzelt in Mischung mit anderen Faserstoffen verarbeitet.

Polyurethanfaserstoffe sind elastomere Polyaddukte mit gummielastischen Eigenschaften (vgl. 4.10.5.). Sie zeichnen sich gegenüber Gummifäden durch eine höhere Zugfestigkeit und bessere Alterungsbeständigkeit aus. Als Monofil- oder Polyfilseide werden sie zu elastischen Geweben, Sport- und Badebekleidung, elastischen medizinischen Bandagen und Miederwaren verarbeitet sowie in der Strumpfindustrie eingesetzt.

Anorganische Faserstoffe. Hierzu gehören neben Glasseide und -fasern (vgl. 6.6.5.) auch Metallfäden, feine Metalldrähte (bis zu 0,02 mm Durchmesser), aus denen man Metallgewebe, Siebe und Gaze herstellt und die man auch als Zierfäden (Effektfäden) in Geweben verwendet (leonische Industrie, nach der spanischen Stadt León). Als Verstärkungsmaterial für Plaste eignen sich in Spezialfällen, z. B. der Raketen- und Raumfahrttechnik, auch *Borfäden* (bis 300 m Länge spinnbar, 0,025 bis 0,25 mm Durchmesser, Schmelzpunkt 2000 °C) und Kristallfasern aus *Siliziumkarbid*, die außerdem auch zur Herstellung von Filtern für Hochtemperaturgase u. a. dienen.

19.2. Herstellung von Fäden

Spinnen ist das geordnete Zusammenführen von Fasern zu Faserbändchen mit dem anschließenden Verdrehen des Bändchens zu einem festen, langen Faden (Garn). Die Herstellung von Chemiefaserstoffen aus einer viskosen Flüssigkeit, die durch feine Düsen gepreßt wird, bezeichnet man als *Erspinnen*.

Spinnereien sind Betriebe, in denen Garne aus Natur- oder Chemiefasern hergestellt werden. In der *Zwirnerei*, die meist eine Abteilung von Spinnereibetrieben darstellt, wird Zwirn gewonnen, in der *Seilerei* werden aus groben Fäden Schnüre, Seile und Leinen gefertigt.

Faden ist der Sammelbegriff für Garne, Seiden, Zwirne und sonstige linienförmige Gebilde, z. B. Kernmantel- und Foliefäden. *Garn* ist ein aus Fasern bestehender und durch Zusammendrehen verfestigter einfacher Faden. Als *Seide* bezeichnet man einen aus einem Elementarfaden (*monofile Seide*) oder aus mehreren Elementarfäden (*polyfile Seide*) bestehenden Faden. *Zwirn* ist ein aus 2 oder mehr Garnen oder Seiden zusammengedrehter (gezwirnter) Faden. Man unterscheidet ein- und mehrstufige Zwirne. Ein *Kernmantelfaden* besteht aus einem mit Garn oder Seide (Mantel) umwundenen Faserbändchen, dem Kern (vgl. Abb. 19.2.2-5). Der *Foliefaden* besteht aus einem schmalen gereckten Foliestreifen, der flach (ungedreht) oder rund (gedreht) und aufgespaltet sein kann.

Handspinnen hat keine industrielle Bedeutung mehr, da das daraus entwickelte *Maschinenspinnen* einen hohen Entwicklungsstand erreicht hat und automatisiert werden kann.

19.2.1. Arbeitsgänge, Werkzeuge und Maschinen der Spinnerei

Vorbereitung. Die zu Ballen gepreßten Faserflokken werden in kleinere Flocken aufgelöst (*aufgelockert, geöffnet*) und *gereinigt*. Trockene, nicht verklebte Fremdteile, wie Staub, Blattreste, Kapsel- und Stengelteile, werden mechanisch entfernt. Verklebte Fremdteile erfordern eine chemische Behandlung (Waschen bei Wollfasern, Röste bei Flachs).

Die Faserflocken werden durch *Zupfen* mit Nadeln oder Zähnen, die sich auf umlaufenden Walzen oder Bändern befinden, oder durch *Schlagen* freischwebender bzw. geklemmter Flocken weiter aufgelöst. *Schlagwerkzeuge* sind radiale Stäbe, Nadeln oder achsparallele Leisten an umlaufenden Wellen oder Walzen

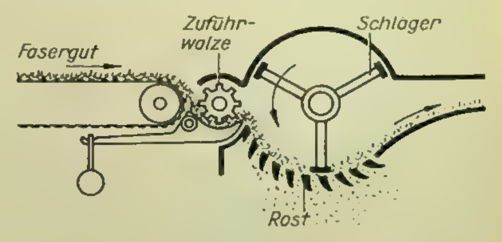


Abb. 19.2.1-1 Schlagmaschine

(Abb. 19.2.1-1). Luftstrom- und Massenkraftwirkungen trennen die leichten Faserflocken von den meist spezifisch schwereren Fremdkörpern, die durch Roste ausfallen.

Kardieren erfolgt auf *Krempelmaschinen*, wobei die Faserflocken zur Faserorientierung durch mit Häkchen- oder Ganzstahlbeschlag (Flachdraht mit Sägezahnform) versehene rotierende Walzen oder wandernde Deckel bis zur Einzelfaser aufgelöst werden. Fremdteile und kurze Fasern werden ausgeschieden. Bei Krempelmaschinen unterscheidet man zwischen *Deckelkrempeln*

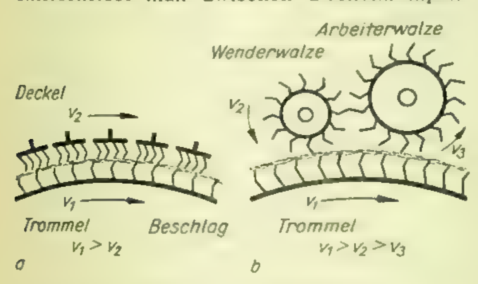


Abb. 19.2.1-2 Prinzip a der Deckelkrempel, b der Walzenkrempel

(*Deckelkarde* in der Baumwollspinnerei) und *Walzenkrempeln* (z. B. Wollspinnerei). Die Fasern werden mit der hohen Geschwindigkeit der Trommel in den Bereich der Deckel bzw. der Wender- und Arbeiterwalzen (Abb. 19.2.1-2) geführt. Die eigentliche Kardierung erfolgt zwischen den Beschlägen von Trommel und Deckel bzw. Arbeiterwalzen. Da einige Fasern mehrmals mit der Trommel umlaufen, ehe sie weitertransportiert werden, entsteht ein Mischungseffekt. Von einer ebenfalls mit Beschlag versehenen Abnehmerwalze wird der *Flor*, die bis zur einzelnen Faser geöffnete und zusammenhängende Faserschicht, durch eine schwingende *Hackerschiene* und/oder durch Abzugswalzen abgenommen. An der *Deckelkarde* (≈ 1 m breiter Flor) und an der *Kammgarnkrempel* (Flor ≈ 2 bis 3 m breit) wird der Flor anschließend durch Trichter und Preßwalzen zu einem runden *Faserband*, dem *Karden-* oder *Krempelband*, verdichtet. *Streichgarnkrempeln* (Arbeitsbreite bis zu 3 m) liefern den Flor in der gesamten Breite zur weiteren Verarbeitung ab.

Kämmen und Hecheln dienen dem Ausscheiden von Kurzfasern, der *Kämmlinge*, sowie dem Reinigen und Orientieren der Fasern. Der Kämmvorgang verläuft periodisch auf der Flachkämm- oder schrittweise auf der Hechelmaschine. Beim Kämmen greifen die auf einer rotierenden Walze zu einem *Kreiskamm* angeordneten Nadeln in das geklemmte Wickelende (*Breitbandende*, *Faserbart*) ein. Der so gekämmte Faserbart wird von einem Walzenpaar, den *Abreißwalzen*, erfaßt und weiterbewegt, wobei jetzt das vorher geklemmte Bartende durch einen einreihigen *Vorstechkamm* gezogen und gekämmt wird. Die so gekämmten „Faserbärte" werden nacheinander *überlappt* (*gelötet*) und zum runden Faserband, dem *Kämmaschinenband* oder *Kammzug* geformt. Die Vorlage ist ein aus ≈ 16 bis 24 Faserbändern bestehendes Breitband.

Hecheln ist das schrittweise Kämmen langer, paralleler und verklebter Fasern (Bastfasern). Nadeln, die auf endlosem Band umlaufen, teilen die in eine Plattenklemme, die *Kluppe*, eingespannten verklebten Fasern auf, streifen noch anhaftende *Schäben* ab und scheiden Kurzfasern (*Werg*) aus.

Vergleichmäßigen und Verfeinern. Nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung läßt sich durch das Zusammenführen von 2 oder mehr Faserbändern, dem *Dublieren* oder *Fachen*, eine Vergleichmäßigung des erhaltenen Faserbandes erreichen. Dazu verwendet man meist *Strecken* (*Baumwoll-*, *Kammgarnstrecke*), die mit *Streckwerken* ausgerüstet sind und durch Änderung des *Verzugs* in Abhängigkeit vom gemessenen Faserbandquerschnitt eine weitere Vergleichmäßigung bringen können (*Regulierstrecke*).

Das Verfeinern von Faserverbänden erfolgt durch Verzug der Faserbänder oder durch Teilen des Faserflors. *Verzug* ist das Auseinanderziehen linienförmiger Fasergebilde (Faserband, Vorgarn) in Richtung ihrer Längsachse durch Streckwerke. Diese bestehen aus 2 oder mehr Walzenpaaren (Abb. 19.2.1-3). Durch das Verziehen wird gleichzeitig eine Verbesserung der

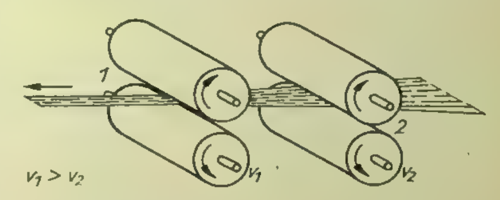


Abb. 19.2.1-3 Zweiwalzenstreckwerk: 1 Ausgangs- und 2 Eingangswalzenpaar (v = Umfangsgeschwindigkeit)

Faserorientierung durch *Ausstrecken* und *Parallelisieren* der Fasern erreicht. Zwischen den Walzenpaaren angeordnete Faserführungsorgane (Druckstange, Riemchen, Nadelfelder) unterstützen den Verzugsvorgang (vgl. Abb. 19.2.2-3). Das *Teilen* wird nur beim Streichgarnspinnverfahren angewandt. Der an der Walzenkrempel gebildete Faserflor wird mittels *Florteiler* in schmale Streifen aufgeteilt und zu Vorgarn weiterverarbeitet.

Verfestigen von Faserverbänden. Gröbere Faserbänder werden zur *Verfestigung* bzw. Verdichtung durch Trichter und belastete Preßwalzen geführt. Feinere Faserbändchen werden in einem *Nitschelwerk* gerundet, verdichtet und

abwechselnd gedreht oder nur durch Erteilung von wenigen Drehungen (*verzugsfähiges Vorgarn*) oder vielen Drehungen (*fertiges Garn*) verfestigt. Man unterscheidet Z- und S-Drehungen (Abb. 19.2.1-4). Drehungswerkzeuge sind z. B. *Flügel-*, *Ring-* und *Zentrifugenspindeln*, die neben der Erteilung echter Drehungen gleichzeitig den Faden aufwinden (vgl. Abb. 19.2.2-2 bis 19.2.2-4).

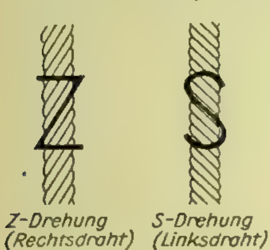


Abb. 19.2.1-4 Drehungsrichtung von Fäden

Echte Drehungen entstehen, wenn ein Faden bzw. Faserbändchen an einer Seite einen nichtdrehenden Klemmpunkt, z. B. die Lieferwalzen eines Streckwerks, aufweist und an der anderen Seite durch Rotation um die Fadenachse verdreht wird.

Falsche Drehungen entstehen, wenn dem Faden zwischen 2 Klemmpunkten, z. B. 2 Walzenpaaren, durch ein Nitschelwerk oder Drehorgan Drehungen erteilt werden. Echte Drehungen verbleiben beim Abzug von der Spule im Faden, falsche Drehungen verschwinden wieder vollkommen.

Bei der Flügelspindel weist die Spule meist eine höhere Drehzahl auf als der Flügel (*voreilende Spule*). Bei der Ringspindel wird der Faden durch einen C-förmigen Drahthaken (*Läufer*) zur Spule (*Kops*) geführt. Durch die Rotation der Spule auf der Spindel (bis 14 000 U/min) wird der Läufer auf einem auf- und abbewegten Ring über dem Faden nachgeschleppt (maximale Läufergeschwindigkeit 32 m/s). Die Zentrifugenspindel besteht aus einem rotierenden Topf (*Zentrifuge*), in dem der durch einen Fadenführer eingeleitete Faden durch Zentrifugalkraft an die Innenwand gedrückt und zu einem „Kuchen" aufgewunden wird. Der „Auflaufpunkt" des Fadens an der Innenwand hat eine geringere Drehzahl als die Zentrifuge. Bei den genannten Spindeln ergibt sich die Aufwindegeschwindigkeit aus dem Produkt von Drehzahldifferenz und Spulenumfang.

19.2.2. Herstellungsverfahren

Die Herstellung von Garnen erfolgt in Abhängigkeit von den Fasereigenschaften und dem gewünschten Garncharakter nach verschiedenen *Spinnverfahren* (Tab. 19.2.2-1). Darüber hinaus können Fäden aus endlosen Elementarfäden (Naturseiden, Chemieseiden glatt und texturiert) sowie Papier-, Folie-, Kernmantelfäden u. a. hergestellt werden.

Tab. 19.2.2-1 *Übersicht der Spinnverfahren*

Baumwollspinnverfahren
Wollspinnverfahren
– Streichgarnspinnverfahren
– Kammgarnspinnverfahren
– Kurzspinnverfahren
Bastfaserspinnverfahren
Seidenabfallspinnverfahren
– Schappespinnerei
– Bourettespinnerei
Konverter- und Direktspinnverfahren

Baumwollspinnverfahren. Nach dem Baumwollspinnverfahren werden *kardierte*, *gekämmte* (besonders feine Garne) und *OE-Garne* (vgl. Abb. 19.2.2-5) hergestellt. In der *Putzerei* werden mehrere Ballen zu einer *Spinnpartie* zusammengestellt, denen die Faserflocken zur besseren Durchmischung in möglichst kleinen Mengen von Hand oder mittels Zupfwerkzeugen entnommen und *Mischballenöffnern* zugeführt werden. Mehrere Mischballenöffner liefern die aufgelockerten Faserflocken auf ein gemeinsames Transportband ab. Danach folgen mehrere *Öffner* (Stufenreiniger, Horizontalöffner, Kastenspeiser o. a.), wobei der Fasertransport meist pneumatisch über Rohrleitungen erfolgt und für eine gleichmäßige Faserzuführung *Füllschächte* mit und ohne Wiegeeinrichtung sowie weitere Regeleinrichtungen zwischengeschaltet sein können. Von der *Schlagmaschine* (vgl. Abb. 19.2.1-1) gelangen die Faserflocken über eine Rohrleitung in je einen Füllschacht mehrerer Deckelkarden (vgl. Abb. 19.2.1-2), die die Faserbänder in Spinnkannen ablegen. Auf nachfolgenden *Baumwollstrecken* (auch Regulierstrecken) mit einem Drei- oder Vierwalzenstreckwerk werden 6 bis

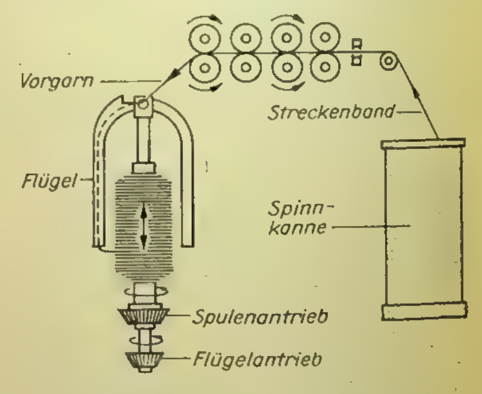


Abb. 19.2.2-2 Flyer mit Walzenstreckwerk (Schema)

8 *Kardenbänder* sechs- bis achtfach verzogen und zu einem *Streckenband* zusammengefaßt. Die Anordnung der weiteren Maschinen ist von den herzustellenden Garnen abhängig. Für die Herstellung gekämmter Baumwollgarne werden auf der *Bandwickelmaschine* bis zu 24 Faserbänder bei max. zweifachem Verzug auf einem Dreiwalzenstreckwerk zu einem ≈ 260 mm breiten Vorlagewickel für die Baumwollkämmmaschine vereinigt.

Vorspinnen. Das *Vorgarn* wird auf dem *Flyer* (Abb. 19.2.2-2), der meist ein Vierwalzenstreckwerk und bis zu 180 Flügelspindeln aufweist, hergestellt. Streckwerk und Flügel (bis 1200 U/min) bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit, während die Drehzahl der voreilenden Spule mit zunehmendem Spulendurchmesser und auch die Geschwindigkeit des auf- und abbewegten Spulenwagens mit den Spulen abnehmen.

Feinspinnen. Die *Ringspinnmaschine* mit *Riemchenstreckwerk* und bis zu 500 Ringspindeln (Abb. 19.2.2-3) liefert das *Feingarn*. Beim Einsatz von OE-Spinnmaschinen erfolgt die Garnbildung direkt aus Streckenbändern.

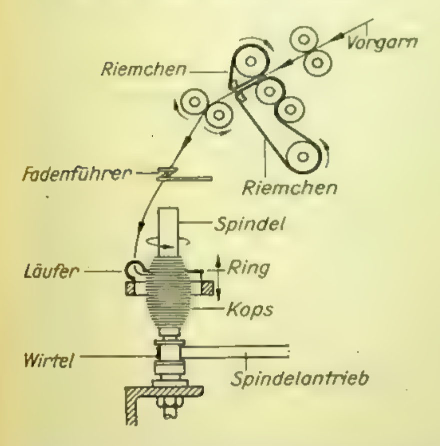


Abb. 19.2.2-3 Ringspinnmaschine mit Riemchenstreckwerk (Schema)

Wollspinnverfahren. Die Herstellung von Garnen aus Wollfasern kann nach dem Streichgarn-, Kammgarn- oder Kurzspinnverfahren erfolgen. Beim *Streichgarnverfahren* werden aus hochbogiger, feiner und stark gekräuselter Wolle *Streichgarne* hergestellt, die grob, voluminös (flauschig), wenig gedreht sind und leicht verfilzen. Bei daraus gefertigten Geweben ist daher, wenn sie später gewalkt und gerauht werden, weder die Bindung noch der einzelne Faden sichtbar. Reine Baumwollgarne, die nach dem Streichgarnspinnverfahren hergestellt werden, bezeichnet man als *Imitatgarne*. In der *Vigognespinnerei* (Streichgarnspinnverfahren) werden *Vigognegarne* hergestellt, Mischgarne aus Baumwolle und Regeneratfasern mit geringem Wollanteil, aus Baumwollabfällen oder 100% Regeneratfasern. Beim *Kammgarnverfahren* wird lange, glatte Wolle nach dem Herauskämmen kurzer Fasern zu *Kammgarnen* versponnen, die stärker gedreht und feiner sind als Streichgarne sowie eine glattere Oberfläche aufweisen.

Vorbereitung. Sie ähnelt derjenigen von Baumwolle. Wolle wird ebenfalls in Ballen angeliefert und diesen in Klumpen entnommen, die man in einer Schlagmaschine, dem *Schlag-* oder *Klopfwolf*, bzw. in einem *Reißwolf* (Tambour mit Zähnen anstelle von Schlägern) auflockert und vorreinigt. In einer *Wollwaschmaschine*, Leviathan (engl. = Ungeheuer, wegen der enormen Größe) genannt, wird die durch einen vorgeschalteten *Öffner* weiter aufgelockerte Wolle entfettet, und zwar durch Einweichen, Waschen (mit Seife, Soda, Waschextrakt, synthetischem Waschmittel o. a.) und Spülen in mehreren hintereinander angeordneten Bassins. In diesen wird die Wolle mit Hilfe von Gabelrechen und von einem zum anderen durch Preßwalzen bewegt. Aus dem Waschwasser gewinnt man das wertvolle *Wollfett* (Lanolin), das in Technik, Medizin und Kosmetik verwendet wird. Nach dem Waschen entfernt man das Wasser durch Zentrifugieren und Trocknen in einer von Warmluft durchströmten, diskontinuierlich arbeitenden Trockenkammer oder -maschine mit kontinuierlichem Gutdurchlauf. In stark verunreinigter Wolle enthaltene Kletten, Holz- und Blattreste u. a. werden durch Spülen in 4%iger Schwefelsäurelösung zerstört (*Karbonisation*), wobei die Zellulose abgebaut wird, so daß diese Verunreinigungen bei der weiteren mechanischen Bearbeitung ausfallen. Die durch Waschen, Färben u. a. verfilzte Wolle wird in einem Schlag- oder Reißwolf wieder aufgelockert (*Wolfen*) und zugleich mit anderen Wollarten (Abfälle) gemischt. Da sie durch das Entfetten rauh und spröde geworden ist, besprüht man sie für das Verspinnen mit Olivenöl oder Olein (*Schmälzen*).

Streichgarnspinnerei. Wie in der Baumwollspinnerei geht dem Spinnen das *Krempeln* oder *Kardieren* voraus. Man benutzt meist 2 Walzenkrempeln (*Zweikrempelsatz*; *Grob-* und *Vorspinnkrempel*) oder auch 3 Walzenkrempeln (*Dreikrempelsatz*; *Grob-*, *Fein-* und *Vorspinnkrempel*). Der an der Vorspinnkrempel gebildete Flor wird in einem Florteiler in schmale, endlose Bändchen aufgeteilt, die nach Durchlaufen eines *Nitschelwerks* (vgl. 19.2.1.) als Vorgarne auf Scheibenspulen aufgewunden werden. Auf der *Ringspinnmaschine* mit Zweiwalzenstreckwerk – deshalb auch als *Zweizylinderspinnerei* bezeichnet – wird das Vorgarn geringfügig verzogen, anschließend gedreht und aufgewunden. Für grobe Garne werden *Dosenspinnmaschinen*

verwendet, wobei das Vorgarn von in rotierenden Dosen eingelegten Scheibenspulen abgezogen wird, Drehungen erhält und in Schlauchkopsform aufgewunden wird.

Kammgarnspinnerei. Die Faserbänder von 7 bis 10 *Doppelkrempeln* (2 Walzenkrempeln hintereinander angeordnet) werden zu einem Faserband vereinigt, leicht verzogen und in Kreuzwickelform gebracht. Auf mehreren *Strecken* mit im Streckwerk bewegten *Nadelfeldern* werden die Faserbänder gefacht und verzogen. Nach der *Kämmaschine* erfolgt das *Nachstrecken* des Kammzugs ebenfalls auf Strecken mit Nadelfeldern.

Kammzüge mit starker Faserkräuselung werden anschließend durch eine *Kammzug-Wasch-und-Plätt-Maschine* (*Lisseuse*) geführt, mit Seifenwasser in mehreren Bassins gewaschen, zwischen Walzen ausgepreßt und auf mehreren beheizten Walzen getrocknet und geglättet (geplättet).

In der *Langfaser-Kammgarnspinnerei* entfällt das Waschen und Plätten. Auf die Lisseuse folgen weitere Strecken mit Nadelfeldern, auf denen durch Fachen und Verziehen das Faserband dann stufenweise zum Vorgarn verfeinert und vergleichmäßigt wird. Beim darauffolgenden Vorspinnen unterscheidet man u. a. das *französische Vorspinnverfahren* mit Nitschelwerken und das *englische Vorspinnverfahren* mit Flyer (Tafel 77). Das Feinspinnen geschieht auf Ring-, selten auf Zentrifugenspinnmaschinen.

Kurzspinnverfahren sind wegen des immer stärkeren Einsatzes von Chemiefasern und zur Verringerung der vielen Maschinenpassagen in der Kammgarnspinnerei entwickelt worden. Dabei kann folgende Maschinenanordnung angewendet werden: Krempelwolf, Doppelkrempel oder modifizierter Zweikrempelsatz, 1 bis 3 Strecken mit oder ohne Nadelfeldern im Walzenstreckwerk, eventuell Flyer, Kammgarnringspinnmaschine.

Bastfaserspinnerei ist der Oberbegriff für das Spinnen von Flachs, Hanf, Jute und Hartfasern. *Flachsfasern* (*Schwingflachs*) werden zu „Bärten" zusammengefaßt und diese auf Hechelmaschinen in Langfasern (*Hechelflachs*) und Kurzfasern (*Werg*) aufgeteilt. Aus den Langfasern wird auf der *Anlegemaschine* ein Band gebildet, das auf weiteren *Strecken* mit bewegtem Nadelfeld im Streckwerk und einer *Vorspinnmaschine* durch Verzug und Fachung verfeinert und vergleichmäßigt wird. Das Feinspinnen geschieht als *Naßspinnen* zur Herstellung feiner Garne, d. h., das Vorgarn wird vor der Spinnmaschine durch heißes Wasser geführt, dadurch erweicht und besser verstreckt. Grobe Garne werden durch *Trockenspinnen* erzeugt. Man setzt meist *Flügelspinnmaschinen*, für feine Garne *Ringspinnmaschinen* ein, die jeweils ein Zweiwalzenstreckwerk enthalten. Neuerdings werden auch Zentrifugenspindeln eingesetzt (Abb. 19.2.2-4). Die Kurzfasern werden nach Kardieren auf einer *Walzenkrempel* genauso verarbeitet wie die Langfasern und ergeben das grobe *Werg-* oder *Towgarn* (Werggarnspinnerei).

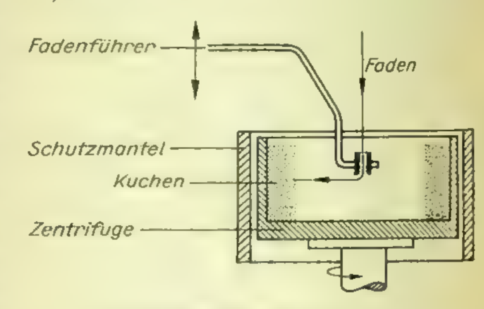


Abb. 19.2.2-4 *Zentrifugenspindel*

Hanffasern werden ähnlich wie grobe Flachsfasern und *Jutefasern* nach dem Wergspinnverfahren versponnen, letztere, nachdem man sie durch Ölbesprühung (*Batschen*) auf einer Quetschmaschine (*Softener*) und durch Ablagern geschmeidig gemacht hat.

Naturseidenspinnverfahren. *Echte Seiden* entstehen durch bloßes Abspulen der Kokonfäden. Nach Entfernen der lockeren *Flockseide* entbastet man die Kokons durch teilweises Auflösen des Seidenleims in einem mit heißem Wasser gefüllten *Schlagbecken*, in dem eine rotierende Bürste außerdem die äußeren Fadenschichten lockert und den Anfang des Fadens fängt, der dann abgehaspelt wird. Um einen annähernd gleichstarken Faden zu erhalten, werden 3 oder mehr der – vom Anfang zum Ende dünner werdenden – Kokonfäden vereinigt und verdreht; die so entstehende *Roh-* oder *Grègeseide* kann ohne weitere Bearbeitung verwebt werden. Zur Herstellung festerer Seidenfäden werden 2 oder mehr Grègefäden zusammengezwirnt (*Moulinieren*); man unterscheidet *Organsine* mit harter Drehung (als *Kettseide* verwendet) und *Trame* mit weicher Drehung (als *Schußseide* verwendet).

Die Seidenabfälle, wie Flockseide, Kokoninnenhaut (Strusa) und Haspelabfall, müssen versponnen werden, um einen Faden zu gewinnen.

Schappespinnerei heißt die Verarbeitung langer Abfallfasern, die einer krempelähnlichen Maschine (*Filling*) zugeführt und anschließend auf einer *Kämmaschine* gekämmt werden. Auf der *Anlegemaschine* wird ein Band gebildet, dieses dann weiter verstreckt und auf der Flügel- oder Ringspinnmaschine zu *Schappe-* oder *Florette-seide* versponnen.

Bourrettespinnerei nennt man das Verspinnen der in der Schappespinnerei anfallenden Kämmlinge und kurzer Abfallfasern. *Bourretteseide*

wird zur Herstellung von groben Seidenstoffen und -decken verwendet.

Offenend-Spinnverfahren. Bei dem klassischen Feinspinnen besitzt die Ringspinnmaschine noch die größte Bedeutung, deren Geschwindigkeit aber durch das Ring-Läufersystem begrenzt ist. Deshalb wurde in den letzten Jahren (besonders in der ČSSR) ein Spinnverfahren entwickelt, das sich von den klassischen grundsätzlich dadurch unterscheidet, daß das Erteilen der Drehungen und das Aufwinden des Garns getrennt voneinander erfolgen. Dadurch ist eine höhere Liefergeschwindigkeit, gegenwärtig bis 150 m/min, möglich. Diese Trennung erfordert eine Unterbrechung des Faserstroms zwischen der Vorlage und dem fertigen Garn. Das hierbei auftretende freie Garnende („*offenes Ende*") führte zu der Bezeichnung *Offenend-(OE-)Spinnverfahren*. Das freie Garnende erhält durch einen *Rotor* oder *Luftwirbel* hohe Drehzahlen (gegenwärtig 30000 bis 90000 U/min, bei pneumatischem Spinnverfahren noch höhere), und die einzeln kontinuierlich zugeführten Fasern drehen sich an dieses Garnende an (anspinnen). Die Vorlage ist ein Faserband von der Baumwollstrecke, das meist durch eine rotierende *Auflösewalze* (mit Sägezahnbeschlag) in einzelne Fasern aufgelöst wird. Das fertige Garn wird ununterbrochen auf eine Spule gewunden, die sich aber – im Unterschied zum Flügel-, Ring- u. a. Spinnverfahren – nur zu diesem Zweck dreht (Abb. 19.2.2-5).

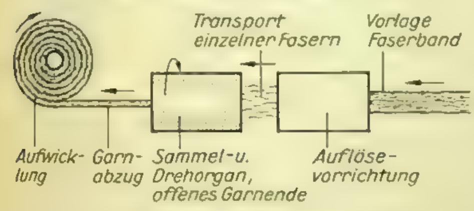


Abb. 19.2.2-5 Prinzip des Offenend-(OE-)Spinnverfahrens

Herstellung von Fäden aus Chemiefaserstoffen. Chemiefasern werden mit bestimmter Länge in Ballenform angeliefert und i. allg. nach Baumwoll- oder Wollspinnverfahren rein oder in Mischung mit anderen Fasern versponnen. Um jedoch das Zuschneiden der Spinnkabel, die aus vielen endlosen Elementarfäden bestehen, und die erneute Faserbandbildung (Faserorientierung) aus den wirren Faserflocken für die Garnherstellung zu vermeiden, wurden Direktspinnverfahren und Konverter entwickelt. Beim *Direktspinnverfahren* werden feine Spinnkabel im Streckwerk einer Feinspinnmaschine (meist Ringspinnmaschine) durch Schneiden oder Reißen zu einem Faserbändchen umgeformt, verzogen und zum Garn zusammengedreht. *Konverter* bilden aus stärkeren Spinnkabeln durch Reißen oder Schneiden verzugsfähige *Konverterbänder*, die fast die gleichen Eigenschaften wie Kammzugbänder aufweisen.

Texturieren nennt man das bleibende Umformen glatter Chemieseiden durch Verändern der Lage der Elementarfäden (vor allem *Kräuseln*) und Fixieren der neuen Lage (meist *Thermofixieren*). Hierbei werden die thermoplastischen Eigenschaften der Synthesefaserstoffe (vor allem Polyamid- und Polyesterseide) ausgenützt, die sich nach Erwärmung beständig verformen lassen.

Die Texturseiden haben garnähnlichen Charakter, größeres Volumen (Bauschigkeit), bessere physiologische Eigenschaften und höhere Elastizität.

Beim *Falschdrahtverfahren* werden dem Faden durch ein Drehröhrchen, der *Falschdrahtspindel*, hohe Drehungen (2000 bis 4000 falsche Drehungen/m) erteilt, deren Lage beim Durchlauf durch eine Heizzone fixiert wird und die nach dem Drehröhrchen wieder zurückgedreht werden. Beim *Stauchkammerverfahren* werden die Fäden kontinuierlich in beheizte Kammern gedrückt und nach bestimmter Verweilzeit aus ihr abgezogen (Zick-Zack-Kräuselung, besonders für Bodenbeläge und Obertrikotagen). Weitere Texturierverfahren sind: *Kantenstauch-*, *Luftdüsen-*, *Zahnradkräuselungsverfahren* u. a.

Foliefädenherstellung. Dazu wird extrudierte Folie aus Polyolefinen (Polyäthylen oder Polypropylen) u. a. Polymeren in schmale Streifen geschnitten, gereckt und ungedreht oder gedreht auf Spulen aufgewunden. Bei hoher Reckung führt die dadurch erreichte Orientierung der Molekülbündel in Reckrichtung zu einer Verringerung der Querfestigkeit. Mit dünnen Elementen, wie Nadeln, Klingen u. ä., läßt sich die Folie dann leicht aufspalten. Gezieltes *Foliespalten* wird mittels rotierender *Nadel-* oder *Klingenwalzen* dadurch erreicht, daß mit bestimmter Umschlingung Folie über die Walzen geführt wird. Die mit höherer Geschwindigkeit bewegten Spaltelemente dringen in die Folie ein und erzeugen nahezu parallel verlaufende Spalte. Einsatzgebiete für Foliefäden sind technische Textilien (Säcke, Hochdruckpressenfäden, Bindfäden, Seile), Fußbodenbeläge, Möbelbezugsstoffe, Mantel- und Kostümstoffe.

Herstellung von Kernmantelfäden. Ein im Streckwerk verzogenes feines Faserbändchen, der *Kern*, wird durch eine rotierende Hohlspindel geführt, die eine Spule trägt (Abb. 19.2.2-6). Der von der Spule abgezogene *Mantelfaden* aus Garn oder Seide umwindet das Faserbändchen an der Vereinigungsstelle. Am unteren Ende der Hohlspindel tritt der fertige *Kernmantelfaden* bzw. *Kernwindefaden* aus und wird aufgewunden.

Herstellung von Zwirnen. Um besonders feste und gleichmäßige Fäden zu erhalten oder spezielle Effektfäden zu erzeugen, werden mehrere Garne oder Seiden zu einem Zwirn vereinigt,

dessen Drehung meist der des einzelnen Garns oder der Seide entgegengesetzt ist.
Die Einzelfäden werden i. allg. nicht unmittelbar vom Kops gezwirnt, sondern erst mehrere Fäden auf Scheiben- oder Kreuzspulen zusammengespult (*gefacht*). Für das Verzwirnen von Garnen verwendet man hauptsächlich *Ring-*, für starke Garne auch *Flügelzwirnmaschinen*, die den Ring- bzw. Flügelspinnmaschinen ähneln,

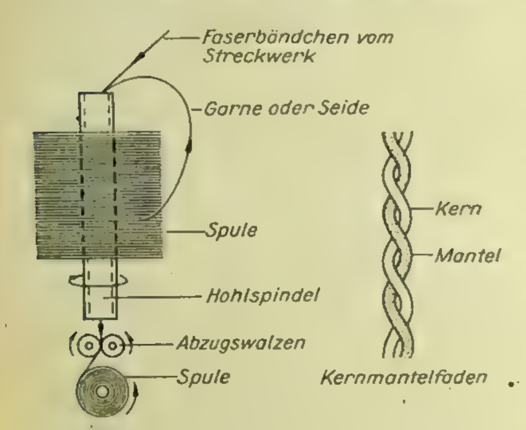


Abb. 19.2.2-6 Prinzip zur Herstellung von Kernmantelfäden

aber keine Streckwerke, sondern nur Lieferwalzen haben. Seiden werden meist auf *Ballonzwirnmaschinen* gezwirnt, bei denen sich der Ablaufkörper dreht, der Faden dabei „Über Kopf" abgezogen und auf einen Auflaufkörper gewunden wird. Die Zwirnstellen sind oftmals übereinander angeordnet (*Etagenzwirnmaschine*). Diese Maschinen können mit *Doppeldrahtspindeln* (DD-Spindeln) – die durch besondere Fadenführung 2 Zwirndrehungen je Spindelumdrehung geben – ausgerüstet und dann auch für feine Baumwoll- und Kordzwirne eingesetzt werden. Zum Zwirnen von Chemieseide benutzt man häufig *Zentrifugenspindeln* (vgl. Abb. 19.2.2-4).
Es gibt *einstufige Zwirne* (2 oder mehr Einzelfäden verzwirnt), *mehrstufige Zwirne* (Verzwirnen von 2 oder mehr Zwirnen), *Effektzwirne* und *V-Zwirne*. *Effektzwirne* erzeugt man durch Verdrehen mehrerer farbiger Einzelfäden (*Mouliné-zwirne*) oder durch unterschiedliche Liefergeschwindigkeiten der zu verzwirnenden, meist farbigen Fäden, so daß Schlingen, Knoten, Noppen u. a. entstehen (Schlingen-, Knoten-, Frottézwirne). *V-Zwirne* bestehen aus 2 von Streckwerken gelieferten und zusammengedrehten Faserbändchen (Spinn-Zwirn-Verfahren). Spinnen, Fachen und Zwirnen erfolgen auf einer Maschine.

Herstellung von Seilen. Schnüre, Leinen, Seile und Taue werden in der Seilerei aus groben Fäden, die man auf *Gillspinnmaschinen* herstellt, oder aus Syntheseseide gefertigt. Zwirnen und Schnüren geschieht auf der bis zu 300 m langen *Seilerbahn*. Beim *Zwirnen* werden mehrere Fäden parallel zwischen 2 sich entgegengesetzt drehende Haken gespannt. Beim *Schnüren* hängen die Fäden nur an einem Ende an einem gemeinsamen Haken, während sie am anderen Ende der Seilerbahn einzeln an Haken befestigt sind, die in Drehung versetzt werden. Das *Verseilen* erfolgt heute meist maschinell. Von *Austreiben* spricht man, wenn mehrere Fäden von ihren Spulen parallel durch eine Loch- oder Registerplatte ab- sowie gemeinsam durch eine konische Buchse gezogen und dann durch einen sich drehenden Haken auf einem fahrenden *Austreiberwagen* zur Litze zusammengedreht werden. 3 oder 4 so hergestellte Litzen werden auf derselben Bahn zum Seil geschlagen. Wirtschaftlicher arbeiten jedoch *Korbverseilmaschinen* (Abb. 19.2.2-7), die in einem sich drehenden Korb 2 oder mehr ebenfalls rotierende Spulen mit Litzen enthalten.

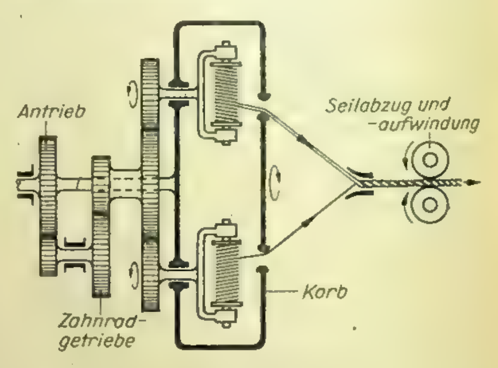


Abb. 19.2.2-7 Korbverseilmaschine

19.3. Herstellung textiler Stoffe

Neben den sog. klassischen Technologien zur Herstellung textiler Stoffe, Weben, Wirken, Stricken, wurde in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl neuartiger Technologien entwickelt, die dem verstärkten Einfluß der Chemisierung und der Automatisierung der Produktionsprozesse in der Textilindustrie Rechnung tragen. Außerdem ist zu verzeichnen, daß sich auch die Einsatzgebiete der klassischen Technologien aufgrund des Einsatzes von Chemiefaserstoffen und der ökonomischen Bedingungen stark verändert haben. Dies trifft besonders für den gesamten Sektor Maschenwaren zu. Abb. 19.3.0-1 beinhaltet die grundsätzlichen technologischen Möglichkeiten zur Herstellung textiler Stoffe.

Merkmale eines Gewebes und Webprinzip. ***Aufbau und Eigenschaften.*** Die Webtechnik ist die älteste Technologie der textilen Flächenbildung. Ein Gewebe entsteht durch die Verkreuzung zweier rechtwinklig zueinander angeordneter Fadengruppen bzw. -systeme. Die Fadengruppe in Längsrichtung wird als *Kette* und die in Querrichtung angeordnete als *Schuß* bezeichnet. Ein Gewebe entsteht unter bestimmten Kraftwirkungen der Fäden, wodurch an den Kreuzungsstellen zwischen Kette und Schuß Reibung wirkt. Damit wird dem Gewebe Stabilität und Schiebefestigkeit verliehen. Durch die relativ gestreckte Lage der Fäden in Längs- und Querrichtung besitzt es geringe Dehnungsempfindlichkeit und kann erhebliche Zugbeanspruchung aufnehmen. Die Eigenschaften eines Gewebes bezüglich Aussehen, Griff, Festigkeit und Fall werden durch die Art der Fadenverkreuzung (Bindung), Anzahl der Fäden in Längs- und Querrichtung je Längeneinheit (Fadendichte), Fadenstärken (Fadenfeinheit) und Materialart bestimmt.

Bindungstechnik. Abb. 19.3.1-1 zeigt die *Grundbindungen.* Die *Leinwandbindung* ist die einfachste Form der Fadenverkreuzung, wobei jeweils im Wechsel Schuß- bzw. Kettfaden auf der Oberseite liegen. Diese Bindung hat die höchste Anzahl von Kreuzungsstellen und wird angewendet für feste und strapazierfähige Gewebe.

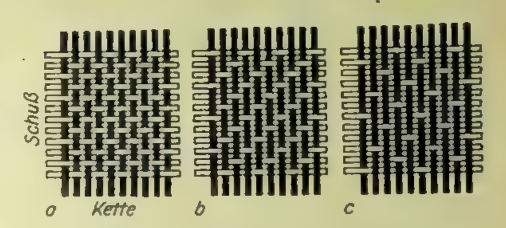


Abb. 19.3.1-1 Grundbindungen der Webtechnik: a Leinwand-, b Köper- und c Atlasbindung

Köperbindungen sind gekennzeichnet durch einen ausgeprägten Diagonalgrad, während bei *Atlasbindungen* durch die geringe Anzahl von Kreuzungsstellen jeweils ein Fadensystem vorherrscht und eine glatte Oberfläche entsteht (z. B. Satin).

Mit Hilfe der Bindungstechnik ist es möglich, Gewebe herzustellen, die aus mehreren Kettfaden- und Schußfadensystemen bestehen und durch Abbindungen miteinander verbunden sind (z. B. Mantelstoffe mit angewebtem Futter, textile Förderbänder).

Mustermöglichkeiten. Außer durch Bindungstechnik können Gewebe auch durch den Einsatz verschiedenartiger und -farbiger Fäden in Kett- und Schußrichtung gemustert werden. Eine Musterung der Kettfäden wird durch entsprechende

Textile Stoffe

Struktur d. Flächengebildes (Ausgangsbasis)	Art der Flächenbildung	spezielle Technologien	Bezeichnung der Erzeugnisse
Vliesstoffe (Fasern, Faservliese)	Verfestigung durch mechan. Bindung	Filzen	Walkfilz
		Nadeln	Nadelfilz
		Vermaschen	Malivlies
		Krumpfen	Texotherm
	Verfestigung durch adhäsive Bindung	Tränken	Vliesett, Retovlies
		Sprühen	Netex
		Pulverauftrag	Netex
		Beschichten	
Fadenstoffe (Fäden)	Fadenverkreuzung	Weben	Gewebe
		Flechten	Posamenten
	Fadenverschlingung	Wirken	Kulier- u. Kettengewirke
		Stricken	Gestricke
		Häkeln	Posamenten
	kombiniertes Fadenverschling. u. Verkreuz.	Nähwirken	Malimo, Schußpol
		Polwirken	Liropol
kombinierte Vlies- u. Fadenstoffe (Fäden, Faservliese)	Verbinden von Faservliesen u. Fäden	Durchwirken von Vliesen	Arachne
		Übernähen von Vliesen	Maliwatt
		Skelettfadenlegen	techn. Filze
Stoffe m. viskoser Struktur (viskose Medien)	Ausbreiten von viskosen Stoffen	Schwemmen	Papertex
Schichtstoffe (textile Stoffe, Fäden, Faservliese, Schaumstoffe)	mech. Verbindg. text. Stoffe, Fäden, Vliese	Nähwirken	Malipol, Voltex
		Aufhöhen von Polnoppen	Tufting
	adhäsives Verbinden text. u. nichttext. Stoffe	Laminieren	Mantelstoffe
		Bondieren	Oberbekleidung
		Kleben	
		Schweißen	Oberstoffe m. Einlagestoff

Abb. 19.3.0-1 Übersicht zur Struktur textiler Stoffe und ihrer Technologien

Anordnung bei der Vorbereitung der Webkette vorgenommen. Die Musterung der Schußfäden erfordert dagegen besondere Vorrichtungen an der Webmaschine.

Prinzip der Gewebebildung und Arbeitswerkzeuge. In Abb. 19.3.1-2 werden die grundsätzlichen technischen Mittel zur Gewebebildung an einer *Spulenschützenwebmaschine* verdeutlicht. Das Längsfadensystem der Kette besteht aus einer großen Anzahl von parallel liegenden Fäden, die auf dem *Kettbaum* aufgewunden sind. Jeder Kettfaden ist durch eine *Weblitze*

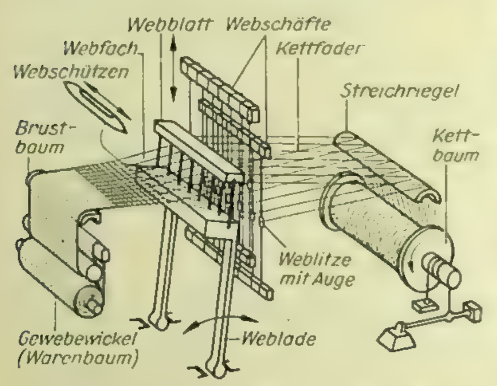


Abb. 19.3.1-2 Prinzip einer Spulenschützenwebmaschine

geführt. Diese Weblitzen werden in Gruppen (*Webschäfte*) oder bei Spezialwebmaschinen auch einzeln (*Jacquardvorrichtung*) aus der Kettebene nach oben und unten bindungsgemäß ausgelenkt. Damit entsteht die zur Fadenverkreuzung notwendige Öffnung, das *Webfach*, in das der Schußfaden mittels eines Webschützens (o. a. technischen Vorrichtungen) eingetragen wird. Der im Webfach liegende Schußfaden wird dann mit der *Weblade*, die das *Webblatt* trägt, an den Rand des bereits gebildeten Gewebes angeschlagen. Das Webblatt sichert den gleichmäßigen Abstand der Kettfäden. Damit ist ein Zyklus der Gewebebildung beendet, und durch mustergemäßes Umsteuern der Weblitzen wird das Webfach für den nächsten Arbeitszyklus gebildet. Der geschilderte Arbeitsvorgang erfordert vorgespannte Fäden des Kettfadensystems, und auch der eingetragene Schußfaden muß eine Mindestspannung besitzen.

Vorbereitung. Das Material für die Fadensysteme Kette und Schuß muß für die Verarbeitung auf einer Webmaschine in die entsprechende Form gebracht werden.

Schären und *Zetteln* sind die Arbeitsgänge, die der Herstellung des Kettbaums dienen. Beim Schärprozeß werden die Fäden von mehreren hundert Spulen zu einem Band vereinigt und auf einer Schärtrommel so viele Bänder gleicher Länge nebeneinander aufgewunden, wie Kettfäden erforderlich sind. In einem zweiten Arbeitsgang wird dann die so vorbereitete Fadenschar auf dem Kettbaum aufgewunden (*Bäumen*). Beim *Zetteln* werden zunächst mehrere Zettelbäume in der erforderlichen Kettbreite, aber mit einer geringeren Fadenanzahl und großer Fadenlänge hergestellt. Mehrere solche Zettelbäume werden dann in einem zweiten Arbeitsgang zur eigentlichen Webkette zusammengeführt. Das *Bäumen* ist hier meist mit dem *Schlichten* vereinigt. Dabei werden die Kettfäden mit einer Stärkelösung getränkt und anschließend getrocknet, wodurch sich die Verarbeitungseigenschaften entscheidend verbessern. *Spulen* dient zur Vorbereitung des Schußmaterials. Die Form der so entstehenden Fadenwickel ist dem Einsatzzweck angepaßt (z. B. Schußspulen). Beim Spulen werden gleichzeitig Fehler im Fadenmaterial (Dick- und Dünnstellen) ausgeschieden. Spulmaschinen sind weitgehend automatisiert. *Schußspulaggregate* können direkt mit der Webmaschine gekoppelt werden. *Kreuzspulautomaten* scheiden Dick- und Dünnstellen automatisch aus und knüpfen den Faden wieder.

Webmaschinen können nach dem Einsatzzweck z. B. in *Teppich-* und *Baumwollwebmaschinen*, nach der Art der Webfachbildung in *Schaft-* und *Jacquardwebmaschinen* oder nach der Art des Schußeintrags in *Spulenschützen-*, *Greiferschützen-*, *Düsenwebmaschinen* eingeteilt werden. Aufgrund der Vielfalt der technologischen Bedingungen werden viele Typen eingesetzt.

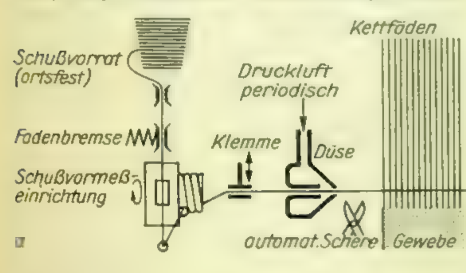
Spulenschützenwebmaschinen, auch als konventionelle Webmaschinen bezeichnet, sind gekennzeichnet durch Webschützen, die den Schußfadenvorrat für eine begrenzte Gewebelänge auf Schußspulen enthalten. Durch die Umkehrung des Schußfadens beim erneuten Schußeintrag (vgl. Abb. 19.3.1-2) entstehen auf natürliche Weise feste Gewebekanten. Spulenschützenwebmaschinen werden heute ausschließlich als Webautomaten eingesetzt. Automatisiert ist dabei der Ersatz der bis auf einen festgelegten Fadenrest aufgebrauchten Schußspule. Dieser Vorgang erfolgt bei vollem Maschinenlauf. Darüber hinaus sind die Maschinen noch mit Wächtereinrichtungen ausgestattet, die die Maschine stillsetzen, wenn der Schußfaden fehlt oder ein Kettfaden reißt. Unter diesen Bedingungen ist ein Weber in der Lage, bis zu 80 Webmaschinen zu bedienen, wenn das Füllen der Schußspulenspeicher durch 1 bis 2 Hilfspersonen vorgenommen wird.

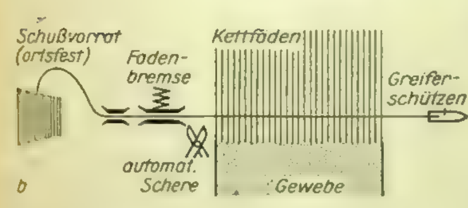
Webmaschinen mit Schußeintrag von ortsfesten Spulen lösen die Spulenschützenwebmaschinen mehr und mehr ab. Mit diesen Webmaschinen werden höhere Leistungen bei geringerer Lärmerzeugung erreicht. Im Gegensatz zu den Spulenschützenwebmaschinen wird jeweils nur die für eine Gewebebreite notwendige Schuß-

fadenlänge durch das Eintragorgan von der ortsfesten konischen Kreuzspule, die über einen großen Fadenvorrat verfügt, in das Webfach eingetragen. Dabei entstehen keine festen Gewebekanten. Die für nachfolgende Arbeitsgänge in der Textilveredlung erforderliche Kantenfestigkeit wird durch gesonderte Leistenvorrichtungen erzeugt.

Abb. 19.3.1-3 zeigt die grundsätzlichen Schußeintragvorrichtungen. Die *Greiferschützen* (Abb. 19.3.1-3a) erfassen den Schußfaden mittels einer Klemme und ziehen den Schußfaden von einer ortsfesten Kreuzspule durch das Webfach. Bei *Greiferwebmaschinen* (Abb. 19.3.1-3b) wird der Schußfaden durch eine zwangsläufig angetriebene Lanze oder durch ein Stahlband eingetragen. Dabei erfolgt meist die Fadenübergabe in der Fachmitte von einem Greiferorgan auf das andere. Abb. 19.3.1-3c zeigt den Schußeintrag mittels Druckluft (pneumatisch) oder Wasserstrahl (hydraulisch). Bei diesen *Düsenwebmaschinen* wird der Schußfaden vorgemessen und dann durch das Webfach geblasen.

Wellenfachwebmaschinen durchbrechen das auf üblichen Webmaschinen diskontinuierliche Arbeitsprinzip Fachbilden, Schußeintrag, Schuß-





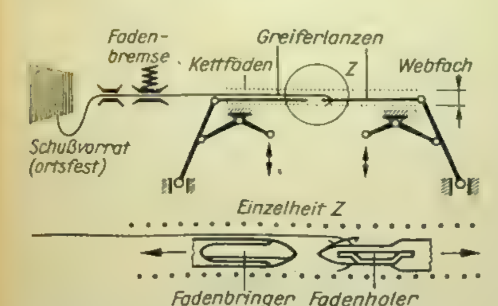


Abb. 19.3.1-3 Grundsätzliche Arten des Schußeintrags: a mittels Luftstrahl, b mittels Greiferschützen, c mittels Greifervorrichtung

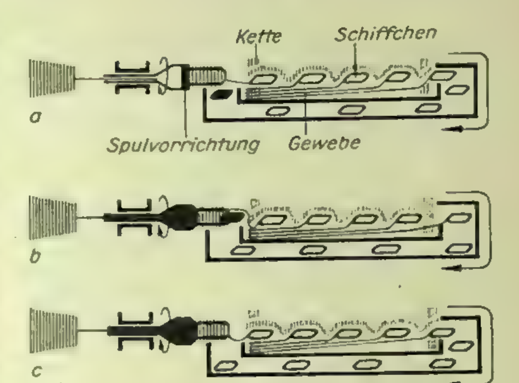


Abb. 19.3.1-4 Prinzip einer Wellfachwebmaschine: a Vorbereitung des Schußvorrats, b Schiffchenfüllen, c Arbeitsbeginn des Schiffchens

anschlag. Diese Arbeitsgänge laufen bei Wellenfachwebmaschinen durch eine Vielzahl von Arbeitselementen gleichzeitig, aber phasenverschoben ab (Abb. 19.3.1-4). Schiffchenförmige Elemente werden von einer zentralen Spulvorrichtung mit dem Schußfadenvorrat für eine Gewebebreite gefüllt und durchlaufen dann das wellenförmige Webfach, wobei sie durch bewegte Stahllamellen angetrieben werden, die gleichzeitig den Schußfaden andrücken. Mit diesem Webprinzip sind erhebliche Leistungssteigerungen gegenüber herkömmlichen Webmaschinen möglich. Der komplizierte Bewegungsablauf engt jedoch die Anwendungsmöglichkeiten noch ein, so daß sie gegenwärtig nur für einfache Gewebe angewendet werden können.

Teppichwebmaschinen sind Spezialwebmaschinen, die in ihrer Konstruktion den erheblichen Kräften Rechnung tragen, die bei der Teppicherzeugung wirken (Tafel 78). Da Teppiche meist aus mehreren Kett- und Schußfadensystemen bestehen und große Musterungsrapporte notwendig sind, besitzen Teppichwebmaschinen sowohl Schaft- als auch Jacquardvorrichtungen für die Fachbildung. Die Jacquardvorrichtungen sind auf einem gesonderten Gerüst über der Webmaschine angeordnet und gestatten die Steuerung der einzelnen Weblitzen über Schnuren, dem Harnisch, mittels Bandlochkarten. Je nach Größe der Jacquardvorrichtung können über 1000 Kettfäden unabhängig voneinander gesteuert werden. Klassische Webteppiche sind unter dem Namen *Tournaiteppiche* bekannt. Solche Teppiche werden wirtschaftlich auf Doppelteppichwebmaschinen hergestellt. 2 Teppiche entstehen gleichzeitig übereinander und sind zunächst durch das Polmaterial miteinander verbunden. Ein in der Maschine hin- und her-

gehendes Messer trennt die beiden Teppiche, so daß sie einzeln aufgewickelt werden können.

19.3.2. Herstellung von Maschenwaren (Fadenverschlingung)

Merkmale von Gewirken und Gestricken. *Gewirke* und *Gestricke* sind textile Flächengebilde, bei denen ein Faden bzw. Fäden durch die Bindungselemente *Masche*, *Henkel* und *Flottungen* formschlüssig miteinander verbunden sind. Gewirke und Gestricke sind entsprechend ihrem Aufbau dehnbar, elastisch in Quer- und Längsrichtung, voluminös und atmungsaktiv. Sie eignen sich demzufolge hervorragend für Unterbekleidung. Im Zusammenhang mit Synthesefaserstoffen, hochleistungsfähigen Wirk- und Strickmaschinen und dehnungsarmen Bindungen werden zunehmend weitere Einsatzgebiete erschlossen, die bisher der Webtechnik vorbehalten waren.

Die Unterscheidung zwischen Wirken und Stricken bezieht sich auf die eingesetzten Maschinen und nicht auf das textile Gebilde. *Wirken* erfolgt mit gemeinsam bewegten, *Stricken* mit einzeln bewegten Werkzeugen. Eine solche Unterscheidung ist nur im deutschen Sprachgebrauch vorhanden.

Bindungstechnik. Die Masche ist eine durch 2 obere und 2 untere Bindungsstellen gekennzeichnete und räumlich gekrümmte Fadenstrecke (Abb. 19.3.2-1a). Sie hat eine linke und eine rechte Seite. Als rechts wird die Seite bezeichnet, auf der die sog. Maschenschenkel liegen. Nebeneinander angeordnete Maschen bilden eine *Maschenreihe*, übereinander angeordnete ein *Maschenstäbchen*. Sind nur die beiden oberen Bindungsstellen vorhanden, so entsteht ein *Henkel* (Abb. 19.3.2-1b). Ungebundene kurze Fadenstrecken, die von Maschen oder Henkeln begrenzt werden, bezeichnet man als *Flottungen* (Abb. 19.3.2-1c). Bei *Kuliergewirken* und *Gestricken* wird eine Maschenreihe durch *einen* Faden gebildet (waagerechter Fadenlauf), wie das aus Abb. 19.3.2-2 ersichtlich ist. Im Gegensatz dazu sind bei *Kettengewirken* so viele Fäden vorhanden, wie Maschen je Reihe gebildet werden (senkrechter Fadenlauf). Die senkrecht verlaufenden Fäden sind bindungsgemäß vernetzt (Abb. 19.3.2-2 *rechts*).

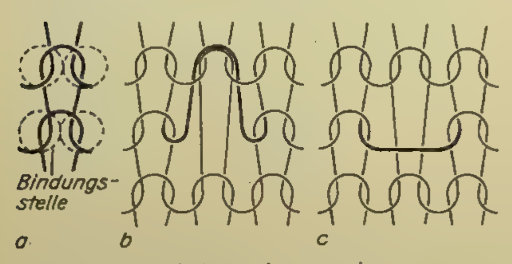


Abb. 19.3.2-1 Bindungselemente der Maschentechnik: a Masche (linke Seite), b Henkel, c Flottung

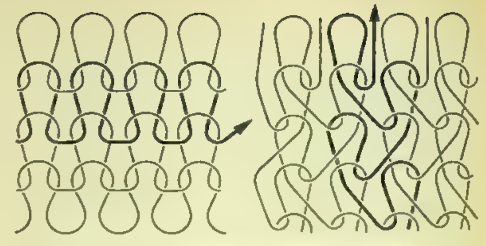


Abb. 19.3.2-2 Kuliergewirk oder Gestrick, Grundbindung Rechts/Links (links) und Kettengewirk, Grundbindung Rechts/Links, Trikot offen (rechts)

Maschinelle Maschenbildung. Zur Maschenbildung in Wirk- und Strickmaschinen werden Nadeln und Platinen verwendet. Dabei ist im Gegensatz zum Handstricken für jede zu bildende Masche einer Reihe jeweils eine Nadel notwendig. Man unterscheidet 3 grundsätzliche Nadeltypen: *Spitzen-*, *Zungen-* und *Schieber-* oder *Rinnennadel* (Abb. 19.3.2-3).

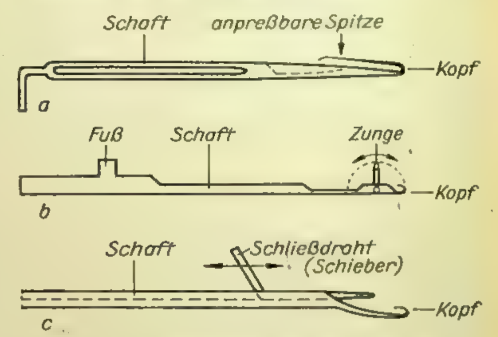


Abb. 19.3.2-3 Maschenstrick- und -wirknadeln: a Spitzen-, b Zungen- und c Schieber- oder Rinnennadel

Bei Anwendung der Spitzennadel (Kulierwirken: Abb. 19.3.2-4a) wird der von einem *Fadenführer* vorgelegte Faden mit Hilfe von *Platinen* nacheinander zu Schleifen geformt (*Kulieren*) und diese in die Nadelköpfe verschoben. Anschließend werden die Nadelköpfe durch Druck geschlossen und die auf den Nadelschäften befindlichen *Halbmaschen* des vorhergehenden Arbeitszyklus über den Nadelkopf geschoben und schließlich abgeworfen (abgeschlagen). Damit ist eine *Maschenreihe* gebildet, und die Arbeitswerkzeuge kehren in ihre Ausgangslage zurück. Bei der Maschenbildung mittels *Zungennadeln* (Abb. 19.3.2-4b; Stricken) wird der Faden vom Fadenführer in den Nadelkopf gelegt. Vorher wurde die Zunge durch die bereits auf der

Nadel befindliche Halbmasche infolge der Relativbewegung zwischen Halbmasche und Nadel geöffnet. Durch das Zurückbewegen der Nadel wird die Zunge wieder geschlossen, die alte Halbmasche abgeworfen, damit zur Masche abgebunden und die neue Halbmasche im Nadelkopf geformt. Durch erneutes Austreiben der Nadel wird die Ausgangslage für die erneute Maschenbildung wieder hergestellt. Die Maschenbildung mittels *Schiebernadel* ist analog dem Zungennadelprinzip. Die Funktion der Zunge übernimmt der gesteuerte Schließdraht.

Maschinen und Anlagen. Bei Flachwirk- und -strickmaschinen sind die Strickwerkzeuge in einer Ebene, bei Rundwirk- und -strickmaschinen im Kreis angeordnet. Bei Wirkmaschinen werden die Nadeln in Gruppen gemeinsam bewegt und die Maschen einer Maschenreihe gleichzeitig gebildet. Bei Strickmaschinen werden die Nadeln einzeln in Nuten geführt und einzeln angetrieben. Die Maschen einer Reihe werden nacheinander gebildet. In den Maschinenbezeichnungen kommen Nadelanord-

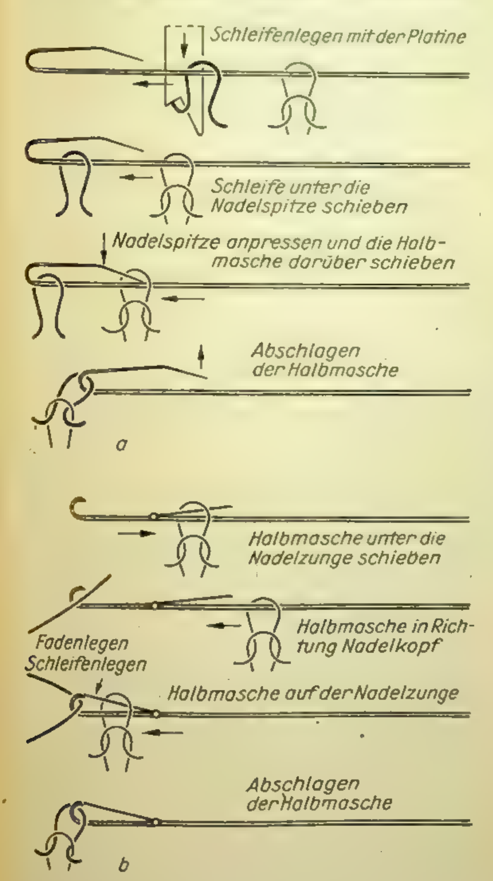


Abb. 19.3.2-4 Arbeitsphasen der Maschenbildung: mittels a Spitzennadel und b Zungennadel

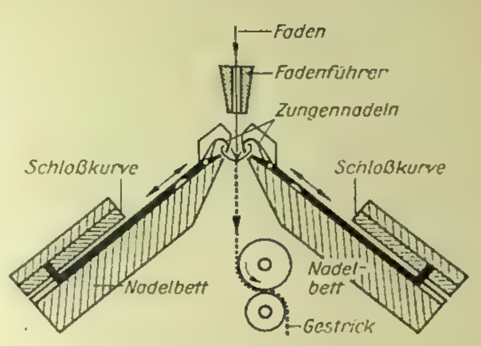


Abb. 19.3.2-5 Prinzip einer Flachstrickmaschine

nung, -antrieb-, technologisches Grundprinzip und Einsatzmöglichkeit (Grundbindungen) zum Ausdruck.

Flachstrickmaschinen werden für die Herstellung der klassischen Obertrikotagen eingesetzt (Tafel 77). Die erzeugten Teile besitzen einen festen Anfang und werden dann schnittgerecht konfektioniert. Flachstrickmaschinen haben meist 2 dachförmig angeordnete Nadelträger (*Nadelbetten*) mit den Führungsnuten für die Nadeln. Ein Schlitten, der über diese Nadelträger gleitet, trägt Kurvenelemente (*Schloßkurven*), durch die die Zungennadeln mittels der aus den Führungen herausragenden Nadelfüßen bewegt werden (Abb. 19.3.2-5). Der Schlitten kann entweder mit der Hand hin und her bewegt (*Handstrickmaschine*) oder durch einen Kettentrieb angetrieben werden. In einem Schlitten können 1 bis 3 Schloßkurvensysteme untergebracht werden, so daß dann bei einem Schlittenhub 1 bis 3 Maschenreihen gebildet werden. Spezielle Konstruktionen, als *Flachrundstrickmaschinen* bezeichnet, haben bis zu 18 umlaufende Schlitten und 2 gegenüberliegende Arbeitsstellen. Damit wird eine erhebliche Leistungssteigerung erreicht. Flachstrickmaschinen haben Arbeitsbreiten zwischen 80 und 1930 mm, die Feinheiten liegen zwischen 2 und 20 Nadeln je englischem Zoll, die Strickgeschwindigkeit kann bis zu 1 m/s betragen.

Rundstrickmaschinen haben als Nadelträger den *Nadelzylinder*, der die Führungsnuten für die Zungennadeln enthält. Der Nadelzylinder mit dem entstehenden Gestrickschlauch läuft meist um, während die Schloßkurven ortsfest ringförmig um den Nadelzylinder angeordnet sind. Damit sind auch die Spulenträger (meist Kreuzspulen) ortsfest. Sie können sternförmig über der Maschine oder in besonderen Gestellen (*Spulengatter*) um die Maschine angeordnet sein.

Kleinrundstrickmaschinen (Abb. 19.3.2-6) werden zur Herstellung von Damenstrümpfen, Strumpfhosen und Socken eingesetzt. Zur Her-

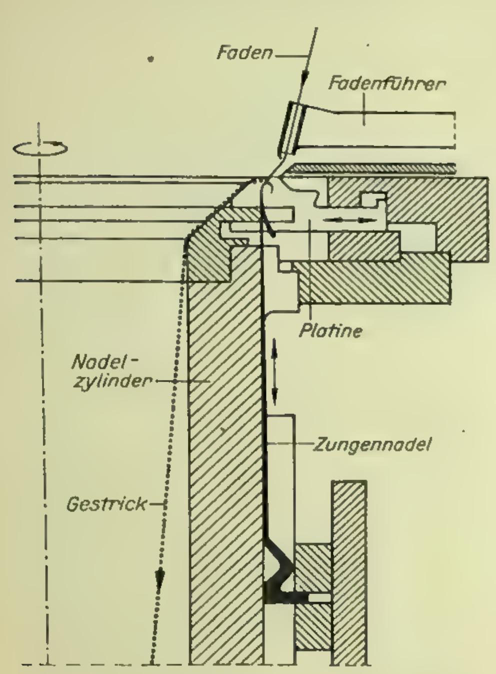


Abb. 19.3.2-6 Prinzip einer Kleinrundstrickmaschine

stellung von Damenstrümpfen haben sie meist einen Nadelzylinderdurchmesser von $3^3/_4$ englische Zoll (95 mm) und 400 Nadeln (34 Nadeln je englischem Zoll). Am Umfang sind 2 bis 8 Arbeitsstellen untergebracht (Schloßsysteme), so daß bei einer Zylinderumdrehung die entsprechende Anzahl Maschenreihen entsteht. Diese Maschinen arbeiten vollautomatisch. Nach einem Programm werden die 2000 Maschenreihen für den Strumpf mit notwendigen Verstärkungen an Rand, Ferse und Spitze erzeugt. Die Herstellungszeit liegt je nach Systemzahl und Qualitätsmerkmalen der Strümpfe zwischen 1,5 bis 8 min. Ein pneumatisches System saugt die fertigen Strümpfe ab und transportiert sie zu einer zentralen Sammelstelle. Die Strümpfe haben zunächst noch die Form eines Hohlzylinders mit einem konstanten Durchmesser. Die Plastifizierbarkeit der Chemiefaserstoffe gestattet die entsprechende Formgebung in nachfolgenden thermischen Arbeitsgängen. Eine Arbeitskraft bedient 40 bis 60 solcher Kleinrundstrickmaschinen. Maschinen zur Herstellung von Socken besitzen einen ähnlichen Automatisierungsgrad.

Großrundstrickmaschinen haben einen Nadelzylinderdurchmesser von $6^1/_2$ bis 36 englischen Zoll. Die traditionellen Einsatzgebiete sind Unter-, Sport- und Obertrikotagen. Durch die Entwicklung der synthetischen Texturseiden konnten Großrundgestricke in Einsatzgebiete eindringen, die bisher ausschließlich den Webwaren vorbehalten waren, wie Damen-, Herren- und Kinderoberbekleidung (Tafel 78), Dekostoffe, Beschichtungsgrund für Kunstledererzeugnisse, textile Tapeten usw. Daraus resultierten Maschinenentwicklungen mit hohen Systemzahlen (RL-Typen bis 120, RR-Typen bis 72 Stricksysteme). Es entstand damit eine hochproduktive Technik zur Herstellung von Gestrikken in Form von endlosen Gestrickschläuchen (bis zu 60 m/h). Die Umfangsgeschwindigkeit liegt je nach Mustertechnik zwischen 0,6 bis 1,2 m/s. RL-Großrundstrickmaschinen haben nur einen Nadelträger, den Nadelzylinder (Aufbau analog der Kleinrundstrickmaschine), RR-Großrundstrickmaschinen sind mit 2 Nadelträgern, Zylinder und Teller, ausgerüstet. Der Teller sitzt über dem Nadelzylinder und besitzt radiale Nuten, die jeweils zum Zylinder auf Lücke angeordnet sind. Zur Herstellung von Interlockwaren (Fachbezeichnung Rechts-Rechts-gekreuzt) werden Großrundstrickmaschinen verwendet, an denen die Nuten der beiden Nadelträger Zylinder und Teller fluchtend zueinander angeordnet sind. Neben diesen grundsätzlichen Unterscheidungsmerkmalen der Maschenbildungselemente werden Großrundstrickmaschinen noch nach den Musterungsmöglichkeiten unterschieden. Bei Jacquardmaschinen werden die Stricknadeln im Zylinder durch entsprechende Programmträger und Stellglieder mustergemäß getrennt, so daß Mehrfarben- und Reliefgestricke hergestellt werden können. Die Nadelauswahl erfolgt mechanisch (Musterplatinen, -räder) mit begrenztem Rapport oder elektronisch (Einzelnadelauswahl mit elektromagnetischen Stellgliedern) bis zum unbegrenzten Rapport.

Kettenwirkmaschinen unterscheiden sich durch die Art der Wirkwerkzeuge (Spitzen-, Schieber- oder Zungennadeln), die Feinheit, die Anzahl der Legeschienen und die Maschinenbreite. Das Einsatzgebiet reicht von Damenunterbekleidung, Damen- und Herrenoberbekleidung, Frottiererzeugnissen, Gardinen, Spitzen, Miederwaren, Möbelbezugsstoffen bis zu Teppichen und Fischnetzen. Die Drehzahlen bewegen sich zwischen 400 und 2000 Maschenreihen/min, wobei die schnellaufenden Maschinen Einzweckmaschinen für glatte Kettengewirke sind. Die Arbeitsbreiten liegen zwischen 84 und 180 englischen Zoll (2130 bis 4570 mm), die Feinheiten zwischen 6 und 36 Nadeln je englischem Zoll.

Abb. 19.3.2-7 zeigt das Querschnittschema einer Kettenwirkmaschine. Die Kettfäden werden von Kettbäumen den Lochnadeln der Wirkstelle zugeführt. Die Lochnadeln befinden sich auf den Legeschienen, deren Schwingbewegung über Gelenkmechanismen erreicht wird. Auch die Bewegung aller anderen Wirkwerkzeuge erfolgt meist durch Gelenkmechanismen. Den notwen-

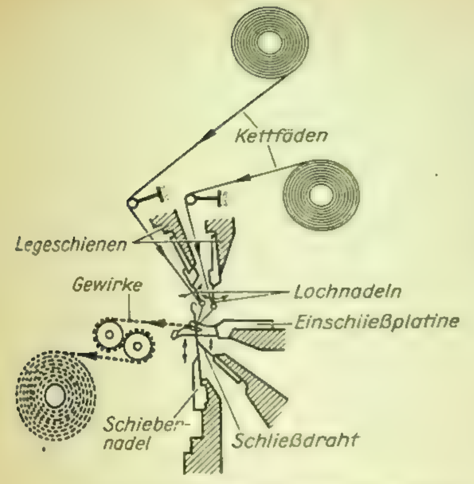


Abb. 19.3.2-7 Prinzip einer Kettenwirkmaschine

digen Versatz der Legeschienen steuern Kurvengetriebe, bei großen Mustern Kettglieder, die als Kurvenstücke gestaltet sind. Der Gewirkeabzug wird über Abzugswalzen durch Umschlingungsreibung realisiert.

19.3.3. Herstellung von Nähwirk-Fadenstoffen

Der Begriff *Nähwirken* beinhaltet die Elemente Nähen = verbinden und Wirken = Maschenbildung, wobei man auch von *Übernähen von Fadenscharen* spricht. Auf eine senkrechte Fadenschar von Kettfäden wird im Winkel von ≈ 90° ein zweites Fadensystem (der Schuß) ebenfalls in Scharen (70 bis 120 Fäden) aufgelegt. Diese gekreuzten Fadenlagen werden durch ein drittes Fadensystem, die Nähfäden, nach der Bindungstechnik der Kettenwirkerei miteinander verbunden. Erzeugnisse dieser Art werden unter dem Begriff MALIMO® gehandelt. Sie haben gewebeähnliche Eigenschaften mit einer eigenen Oberflächenstruktur. Sie werden in den Standardbreiten 1 000, 1 600 und 2 400 mm hergestellt und werden in der Wäsche-, Bekleidungs- und Lederindustrie sowie für technische Zwecke angewendet.

Werkzeuge und Maschinen. Die verwendeten Werkzeuge entsprechen prinzipiell denen der Kettenwirktechnik. Abb. 19.3.3-1 zeigt einen Querschnitt durch die Arbeitsstelle einer Nähwirkmaschine. Die Schußfäden werden durch einen hin- und hergehenden Wagen in an Transportketten befestigte Hakennadeln eingelegt und so zur Arbeitsstelle befördert. Die Kettfäden werden der Arbeitsstelle nahezu senkrecht über feststehende Lochnadeln zugeführt. Die Nähfäden werden den horizontal die Fadenscharen durchstechenden Schiebernadeln durch eine entsprechend bewegte Lochnadelbarre vorgelegt. Die Fadenscharen Kett- und Nähfäden werden von Kettbäumen abgezogen, während für das Schußfadensystem entsprechende Gatter mit konischen Kreuzspulen angeordnet sind. Nähwirkmaschinen werden je nach Erzeugnis in den Maschinenfeinheiten von 3,5 bis 22 Nadeln je 25 mm hergestellt. Die Maschinenleistung beträgt bei Drehzahlen zwischen 1 000 bis 1 500 U/min 50 bis 150 m Stoff/h. Zur Gewährleistung der Qualität sind alle Fadensysteme mit Wächtereinrichtungen versehen, die die Maschine bei Fadenbruch automatisch stillsetzen.

19.3.4. Herstellung kombinierter Vlies- und Fadenstoffe

Faservliese werden durch in den Faserverband eingearbeitete Fäden verfestigt. Die Anordnung der Fäden zur Verfestigung haben den Charakter von Maschen bzw. Nähten. Die auf diese Weise

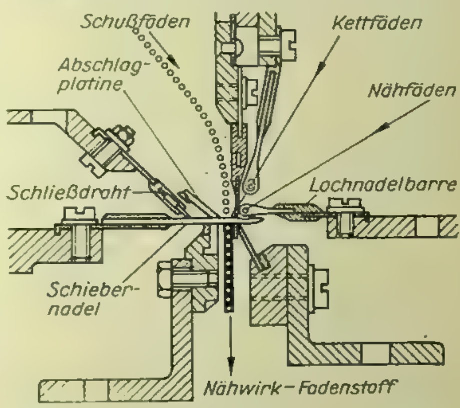


Abb. 19.3.3-1 Nähwirkmaschine, Typ Malimo

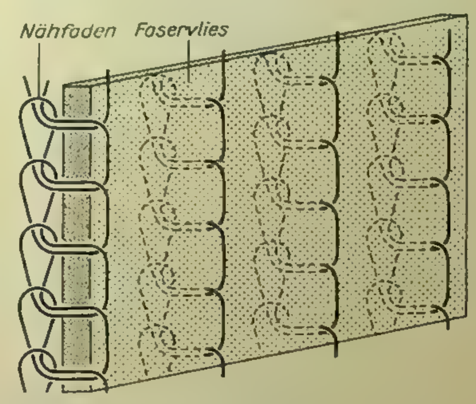


Abb. 19.3.4-1 Struktur eines „Vliesnähgewirks „Maliwatt®" (Fransenbindung)

entstehenden Produkte werden auch als Vliesnähgewirke bezeichnet (Abb. 19.3.4-1). Sie werden für Kleider- und Dekostoffe, wärmende Zwischenfutter für Winterkleidung, Arbeitsschutzbekleidung, Isolierstoffe in Transportmitteln (Automobil-, Waggon-, Schiffs- und Flugzeugbau), zur Schall- und Wärmeisolierung, für Kaschiergrund und Verpackungsmittel angewendet. Bekannte Verfahren zur Herstellung solcher Erzeugnisse sind das Nähwirkverfahren Maliwatt® (DDR), das Arachne-Verfahren (ČSSR) und das A-Tsch-W-Verfahren (UdSSR).

Werkzeuge und Maschinen zur Verfestigung der Faservliese entsprechen den Nähwirk- bzw. Kettenwirkmaschinen. Sie sind lediglich mit einer entsprechenden Zuführeinrichtung für das Faservlies versehen. Diese Maschinen sind meist mit dem sog. Vliesbildner (z. B. Krempelanlage, vgl. 19.2.) und entsprechenden Transportvorrichtungen zu einer kontinuierlich arbeitenden Anlage vereinigt, z. B. Maliwattanlagen.

19.3.5. Herstellung von Vliesstoffen durch mechanische Verfestigung

Mechanisch verfestigte Vliese werden handelsüblich als *Filze* bezeichnet. Der bei dem Faserstoff Wolle aufgrund der vorhandenen Oberflächenstruktur auftretende Effekt des gegenseitigen Verhakens der Fasern wird im *Walkprozeß* (vgl. 19.4.1.) unter Einwirkung von Druck, Feuchtigkeit und Wärme verstärkt. Bei Einsatz anderer Faserstoffe wird dieser Effekt mit mechanischen Mitteln erreicht, wobei man auch thermische Wirkungen durch unterschiedlichen Schrumpf der Faserstoffe zusätzlich zur Verfestigung anwendet. Solche Vliesstoffe, meist nach dem Herstellungsverfahren bezeichnet (z. B. *Nadelfilz*), werden zur Schall- und Wärmeisolierung, als Tapeziermaterial, Fußbodenbelag, Teppichunterlagen, Decken usw. verwendet. Die Flächenmassen bewegen sich je nach Einsatzzweck zwischen 50 bis 7 000 g/m^2.

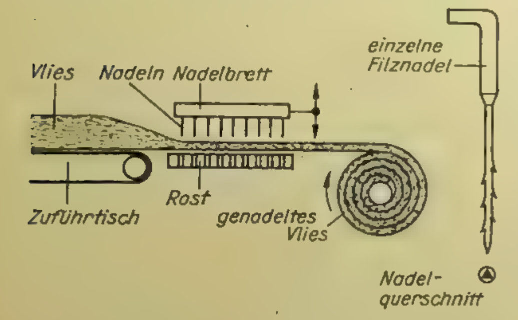


Abb. 19.3.5-1 Prinzip einer Nadelfilzmaschine

Werkzeuge und Maschinen. Das am häufigsten angewendete Verfahren zur mechanischen Verfestigung von Faservliesen ist das *Vernadeln*. Entsprechende Nadelfilzmaschinen besitzen besonders geformte und mit Widerhaken versehene Nadeln, die in einem Nadelbrett angeordnet sind und durch periodische Hubbewegung das vorgelegte Faservlies durchstechen. Damit werden Fasern senkrecht zu den Faserschichten angeordnet und der Verfestigungseffekt erreicht. Anzahl, Anordnung und Form der Nadeln hängen von den zu vernadelnden Fasern, der gewünschten Verdichtung des Vlieses und seiner Flächenmasse ab.

Abb. 19.3.5-1 zeigt die prinzipielle Arbeitsweise einer Nadelfilzmaschine. Moderne Anlagen arbeiten mit Hubzahlen von 900 Hüben/min.

Eine mechanische Verfestigung von Faservliesen ist auch mit den beschriebenen Mitteln der Nähwirktechnik möglich. Die Nadeln einer Nähwirkmaschine durchstechen das Faservlies und bilden beim Rückgang mit den im Nadelkopf erfaßten Fasern (Faserbüschel) Maschen. Erzeugnisse dieser Art werden unter dem Begriff *Malivlies* gehandelt.

19.3.6. Herstellung von Vliesstoffen durch adhäsive Verfestigung (Kleb-Vliesstoffe)

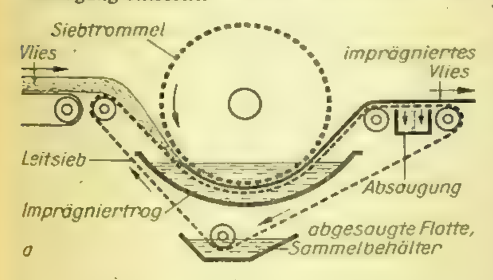
Die Eigenschaften der adhäsiv verfestigten Vliesstoffe werden maßgebend durch die Bindemittel und Herstellungsverfahren bestimmt. Als Bindemittel werden bei Viskosefasern vorwiegend natürlicher Kautschuk-Latex und bei Mischungen von Chemie- und Viskosefasern Butadien-Akrylnitril-Latex verwendet. Darüber hinaus werden noch andere Bindemittel, wie z. B. Polyvinylazetat, oder thermoplastische Fasern eingesetzt.

Der Einsatzzweck solcher Vliesstoffe reicht von sog. Wegwerfartikeln, z. B. hygienische Taschentücher, Servietten, Wischtücher und Staubtücher, über elastische Einlagestoffe für Bekleidung, Beschichtungsgrund, Dekostoffe bis zu schweren Isolierstoffen. Die Erzeugnisse sind – außer bei Isolierstoffen – durch eine geringe Flächenmasse (meist zwischen 35 bis 200 g/m^2) gekennzeichnet, haben geringe Schrumpfneigung, gute Elastizität und Porosität. Bekannte Erzeugnisse sind *Retovlies®* und *Vlieseline®*

Verfahren zur adhäsiven Vliesverfestigung. Die Verfahren sind gegenüber der mechanischen Vliesverfestigung (vgl. 19.3.5.) durch hohe Produktivität gekennzeichnet. Es handelt sich hierbei um automatisierte Fertigungsstraßen, wobei die Abstimmung der Kapazitäten der Teilabschnitte oft problematisch ist (z. B. Imprägnierung, Kondensation, Trocknung).

Es werden folgende grundsätzliche Technologien zur Herstellung von Kleb-Vliesstoffen unter-

schieden:
– aus wäßrigen Faserdispersionen (vgl. 7.6.),
– Imprägnierverfahren,
– Anwendung von Druck und Wärme.
Imprägnierverfahren sind die am meisten verwendeten Technologien zum Aufbringen der Bindemittel. Unter *Imprägnieren* versteht man das Durchtränken eines Vlieses mit flüssigen bzw. quasiflüssigen Bindemitteln, die meist als wäßrige Dispersionen vorliegen, und deren Ablagerung auf dem Fasermaterial. Dabei werden verschiedene technische Mittel angewendet, die der mechanischen Belastbarkeit der Faservliese und ihrer Struktur Rechnung tragen (Abb. 19.3.6-1). Der Transport des Vlieses erfolgt durch entsprechende Leitsiebe (meist aus Stahl) oder eine Siebtrommel. Der Überschuß an Imprägniermittel wird durch Preßwalzen oder Absaugung entfernt.



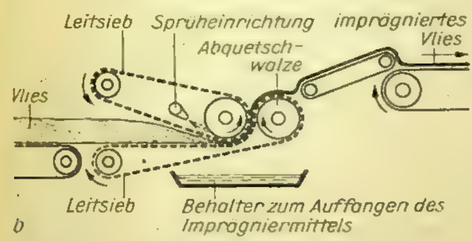


Abb. 19.3.6-1 Imprägnierverfahren zur Vliesverfestigung: a Badimprägnierung zwischen Sieb und perforierter Trommel, b Bindemittelauftrag durch Sprühung

Verfahren durch Einwirkung von Druck und Wärme verwenden thermoplastische Bindemittel (auch Kautschuk oder thermoreaktive Bindemittel). Diese Bindemittel sind meist pulverförmig. Die Arbeitsverfahren der Verfestigung sind das Auftragen des Bindemittels, das Erhitzen von Vlies und Bindemittel und das Pressen. Man bezeichnet solche Verfahren auch als *Warmpressen*. Ökonomisch sind diese Verfahren sehr günstig, problematisch ist jedoch die gleichmäßige Verteilung des Bindemittels und damit die Sicherung der Qualität solcher Erzeugnisse. Es sind auch *Kaltpreßverfahren* bekannt, die jedoch meist vorimprägnierte Trägerelemente zur Verfestigung benutzen, z. B. Fäden, Netze, Folien.

19.3.7. Herstellung textiler Schichtstoffe

Das Gemeinsame textiler Schichtstoffe ist, daß textile Schichten oder Flächen mit mechanischen oder chemischen Mitteln verbunden werden, um neue Gebrauchseigenschaften der Erzeugnisse zu erreichen. Dabei steht meist die Erzielung einer bestimmten Oberflächenstruktur im Vordergrund bzw. werden textile Stoffe mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften miteinander verbunden. Das Einsatzgebiet solcher Erzeugnisse reicht vom textilen Fußbodenbelag über Oberbekleidung, Pelzimitation bis zu technischen Produkten.

Verbinden eines Faservlieses mit einem textilen Flächengebilde. Beim *Voltexverfahren* (*vo*luminöse *Tex*tilien) wird ein zugeführtes Faservlies (längsorientierte Fasern) mit den Werkzeugen der Nähwirktechnik (Nähwirkmaschine Typ Malipol) in ein vorhandenes textiles Flächengebilde (Gewebe, Nähwirkfadenstoff usw.) eingebunden, indem die Nadeln das Flächengebilde durchstechen und mit den erfaßten Faserbüscheln Maschen bilden. Die Faserenden bilden auf der Oberseite einen pelzähnlichen Flor.
Bei Anwendung spezieller Großrundstrickmaschinen kann ein Faservlies unmittelbar dem Stricksystem zugeführt werden. Dadurch kann während des normalen Strickprozesses zusätzlich das zugeführte Faservlies mit vermascht werden, so daß auf einer Gestrickseite die Faserenden einen pelzähnlichen Flor bilden. Diese Technik wird international vorwiegend für die Herstellung synthetischer Pelze angewendet. Samt- und plüschartige Erzeugnisse werden auch hergestellt, indem Fasern elektrostatisch aufgeladen und mittels Bindemittel (vgl. 19.3.6.) senkrecht auf textile Flächen aufgeklebt werden.

Verankerung von Polnoppen auf textilen Flächengebilden. Nach dem Nähwirkprinzip *Malipol* kann eine Fadenschar mittels Durchstichnadeln erfaßt, in eine Grundware eingebunden werden und dabei über sog. Polplatinen einseitig Polnoppen bilden. Erzeugnisse dieser Art werden zu Frottierwaren verarbeitet.

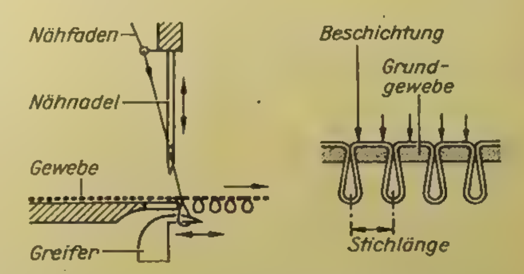


Abb. 19.3.7-1 Werkzeuge einer Tuftingmaschine (links), Erzeugnisstruktur (rechts)

Beim *Tuftingverfahren* werden Polnoppen nach dem Nähprinzip in eine Grundware eingebracht. Da diese so hergestellten Fadennoppen nicht verriegelt sind, ist eine Fixierung durch Rückenbeschichtung notwendig (Abb. 19.3.7-1). Dieses Verfahren wird ausschließlich zur Herstellung textiler Fußbodenbeläge angewendet. Es sind auch Verfahren bekannt, wo Polfadennoppen durch entsprechende Vorrichtungen geformt und auf textile Stoffe aufgeklebt werden.

Adhäsive und chemische Verbindungen textiler und nichttextiler Schichten. Verfahren dazu sind unter den Begriffen *Laminieren* und *Bondieren* bekannt (vgl. 19.4.2.).

19.4. Textilveredlung

Zur *Veredlung* werden die Textilien verschiedenen chemischen, mechanischen und thermischen Behandlungen unterzogen, wodurch gewünschte Effekte (z. B. Weißgrad, Farbe, Muster) und Gebrauchswerteigenschaften (z. B. knitterarm, pflegeleicht, rauhe oder glatte Oberfläche, weicher Griff) entstehen. Die Veredlung erfolgt bereits bei losen Fasern und bei Fäden, vorwiegend aber an textilen Stoffen im gerafften Strang und in breiter Stoffbahn entweder diskontinuierlich (auf Apparaten oder Einzelmaschinen) oder kontinuierlich (auf verketteten Einzelmaschinen oder speziellen *Kontinue-Anlagen*). Man spricht von *Apparat*, wenn das Textilgut ruht und das Behandlungsmedium um oder durch dieses bewegt wird, dagegen von *Maschine*, wenn sich das Textilgut selbst in der oder durch die Einrichtung bewegt. Apparate und Maschinen werden zu *Anlagen* mit hohem Automatisierungsgrad zusammengestellt.

19.4.1. Vorbehandlung

Die Vorbehandlung dient der Vorbereitung der Faserstoffe auf die eigentliche Textilveredlung, indem die Fasern von allen anhaftenden Verunreinigungen befreit werden.

Vorbehandlung von Zellulosefasern. *Sengen*. Abstehende Faserenden an Fäden und Stoffbahnen werden auf *Garn-* und *Gewebesengmaschinen* mit offener Gasflamme oder elektrischem Brenner abgesengt, so daß eine glatte Faden- oder Stoffoberfläche entsteht.

Entschlichten. Die in der Weberei zur Verringerung der Fadenreibung aufgebrachte wasserlösliche oder Stärkeschlichte wird ausgewaschen oder enzymatisch bzw. fermentativ abgebaut.

Merzerisieren. Um Baumwollgarnen und -geweben einen seidenähnlichen Glanz zu verleihen und um ihre Farbaufnahme zu verbessern, werden sie mit Natronlauge unter Zugspannung behandelt.

Kochen – Beuchen. Durch *Kochen* in Behältern unter Normaldruck (bis 100°C) oder *Beuchen* in Druckkesseln (bei 132°C und Überdruck von 45 bis 215 kPa) werden die auf den Baumwollfasern natürlich haftenden Wachs- und Fettsubstanzen entfernt sowie die Schalen aufgeschlossen. Es wird dazu eine alkalische Flotte mit Natronlauge oder Soda verwendet. Gewebe werden meist kontinuierlich mit Natronlauge getränkt und anschließend bei 100°C gedämpft.

Vorbehandlung von Wolle. *Rohwollwäsche*. Durch leicht alkalisches Waschen in kontinuierlichen Wollwaschanlagen wird die Wollfaser von allen anhaftenden Verschmutzungen, wie Fett, Schweiß, Schmutz, Kot, befreit.

Karbonisieren. Pflanzenreste werden von der Wollfaser und aus Wollgeweben beseitigt, indem diese in verdünnter Schwefelsäure getränkt und anschließend bei 110°C mit Heißluft behandelt (*gebrannt*) werden.

Walken bewirkt ein Verfilzen der Wollfasern untereinander, so daß die Stoffoberfläche einen verdichteten, filzigen Charakter annimmt. Der Wollstoff wird in feuchtem Zustand auf der Walkmaschine von allen Seiten mit stauchenden Werkzeugen bearbeitet, wobei sich die Stoffabmessungen durch die Verdichtung bis zu 50% verringern können.

Vorbehandlung von Chemiefasern. Chemiefasererzeugnisse werden meist gewaschen, wobei vor allem der Pigmentschmutz entfernt wird. Öle, Präparationen und Schmälzen werden durch Wasser schlecht, durch organische Lösungsmittel sehr gut abgelöst.

19.4.2. Naßveredlung

Die Naßveredlung umfaßt das Bleichen, Färben, Drucken, Waschen sowie die Hochveredlung, die chemische Appretur.

Bleichen. Durch das Bleichen werden Naturfarbstoffe bzw. herstellungsbedingte Anfärbungen aus den Fasern entfernt, so daß ein weißes Textilgut entsteht. Pflanzenfasern werden mit Natriumhypochlorit, Peroxid oder Natriumchlorid oxydativ, tierische Faserstoffe mit schwefliger Säure, Bisulfit oder Hydrosulfit reduktiv gebleicht. Für Chemiefaserstoffe wird vor allem Natriumchlorit, -hypochlorit oder Schwefeldioxid eingesetzt. In fast allen Fällen wird an die Bleiche noch ein *Aufhellerbad* angeschlossen, um ein besonders strahlendes Weiß zu erreichen. Fasern und Fäden werden diskontinuierlich im Apparat gebleicht. Für Stoffe wird die diskontinuierliche Bleiche auf *Haspelkufen* oder dem *Jigger* eingesetzt, für große Mengen wird kontinuierlich im Strang oder in breiter Stoffbahn auf *Kontinue-Bleichanlagen* gebleicht. Für Gewebe in breiter Stoffbahn werden

gegenwärtig sehr ökonomische halbkontinuierliche *Imprägnier-Aufdock-Anlagen* verwendet.
Färben. Ein großer Teil der Textilien wird gefärbt. Dazu werden synthetische Farbstoffe verwendet, z. B. substantive, basische, Säure-, Schwefel-, Küpen-, Reaktiv-, Dispersionsfarbstoffe. Die Echtheiten, z. B. Licht-, Wasch-, Reibechtheit, sind unterschiedlich und werden durch die Art der Bindung zwischen Farbstoff- und Faserstoffmolekül (chemische Bindung, physikalische An- bzw. Einlagerung) bestimmt. Zu den echtesten Färbungen zählen solche mit Küpen-, Reaktiv- und Dispersionsfarbstoffen (vgl. 4.12.2).
Im *Färbeapparat* werden Fasern, Fäden (auf Kreuzspulen oder Kettbäumen) und Stoffe, vor allem Gewebe und Gewirke, bei Normaldruck (bis 100°C im Normaldruckapparat) oder bei erhöhtem Druck (bis 260 kPa Überdruck, max. 137°C Flottentemperatur) im *Hochtemperaturfärbeapparat* (Abb. 19.4.2-1) gefärbt, indem die Flotte in wechselnder Richtung durch das Textilgut hindurchgedrückt wird. Stoffe werden bei kleinen und mittelgroßen Partien als endloser Strang auf *Stückfärbemaschinen* (Haspelkufen) oder in breiter Bahn auf dem *Färbejigger* gefärbt, wobei dieses diskontinuierliche Verfahren so lange durchgeführt wird, bis der gewünschte Farbton erreicht ist. Stoffe, vor allem Gewirke und Gestricke (Großrundgestricke) aus Polyester und Polyamid mit strukturierten Oberflächen und voluminösen Mustern werden vorwiegend auf *Hochtemperatur-Färbemaschinen* (HT-Düsen-, HT-Sanftfärbemaschine, HT-Haspelkufe) gefärbt, wobei der Stoffstrang durch Flottenströmung auf Düsen und/oder durch Haspeln sehr spannungsarm bewegt wird.

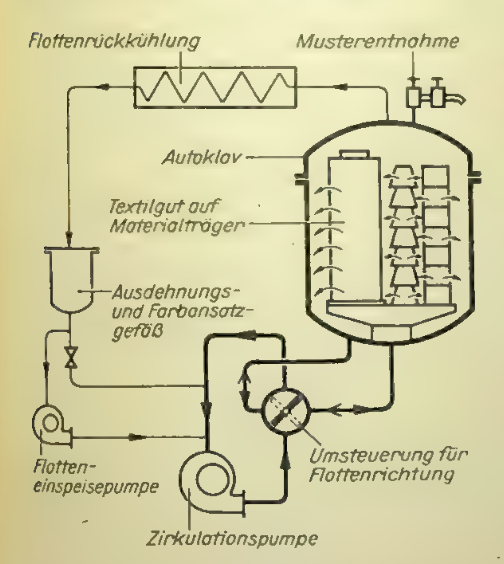


Abb. 19.4.2-1 Stehender Hochtemperatur-Radialfärbeapparat; im Autoklaven (von links nach rechts) Kettbaum, konische und zylindrische Kreuzspulen

Große Partien von Stoffen, z. B. Köper für Berufskleidung, Inletts, unigefärbte Bekleidungsstoffe, werden auf *Kontinue-Anlagen* gefärbt. Auf dem *Foulard* wird die Farbflotte von Walzenpaaren in die durchlaufende Stoffbahn gedrückt, die anschließend in einer *Zwischentrocknungsmaschine* getrocknet, im *Dämpfer* zur Farbstoffixierung gedämpft und dann auf *Breitwaschmaschinen* gewaschen und zur Echtheitsverbesserung nachbehandelt wird. Statt der Farbstoffixierung durch Dämpfen wird auch die Trockenhitzefixierung bis 177°C, bei Geweben aus Polyester bis 212°C, angewendet, wodurch eine rasche Farbstofflösung erreicht wird (Thermosolieren).
Drucken. Das Erzeugen ein- oder mehrfarbiger Muster auf der Oberfläche weißer oder gefärbter Textilien kann auf verschiedene Weise erfolgen. Beim *Direktdruck* wird der Farbstoff als Muster auf weiße oder hellfarbige Stoffbahnen gedruckt. Von *Reservedruck* spricht man, wenn ein reservierendes Mittel, das den Farbstoff abhält, als Muster aufgedruckt wird, so daß beim anschließenden Färben die bedruckten Stellen frei bleiben. Beim *Ätzdruck* wird eine bereits vorgefärbte Stoffbahn mit einer die Farbe zerstörenden Ätzpaste bedruckt, so daß weiße Muster auf farbigem Grund (*Weißätze*) oder, wenn das Ätzmittel selbst Farbe enthält, farbige Muster auf farbigem Grund (*Buntätze*) entstehen. Der Textildruck wird auf Sieb- und Tiefdruckmaschinen durchgeführt.
Rouleauxdruckmaschinen. Die Stoffbahn wird über einen Tambour geführt, an den die Druckwalzen mit eingraviertem oder eingeätztem Muster angedrückt werden. Die im Muster enthaltene Farbe wird beim Abrollen auf die Stoffbahn übertragen (vgl. 17.2.4.). Es können bis zu 16 Farben gedruckt werden, wobei für jede Farbe eine extra Druckwalze notwendig ist. Die durchschnittliche Druckgeschwindigkeit beträgt 60 m/min.
Filmdruckmaschinen. Die auf ein endloses Gummidrucktuch geklebte Stoffbahn wird mit diesem absatzweise über einen Drucktisch bewegt. Beim Stillstand werden Gazeschablonen, deren Lackschicht an den Musterstellen durchlässig ist, aufgelegt. Eine Rakel streicht durch das Muster die Farbpaste auf die Stoffbahn (vgl. 17.2.3.).
Rotationsschablonendruckmaschinen. Diese Maschinentype hat sehr an Bedeutung gewonnen und wird zum Bedrucken aller Stoffe bis hin zum Fußbodenbelag eingesetzt. Eine für jede Farbe erforderliche Rotationsschablone (Nickel-Zylinder-Mantel, 0,08 bis 0,1 mm Wanddicke, mit entsprechend dem Muster durchlässiger Manteloberfläche) rollt auf der auf einem Gum-

midrucktuch aufgeklebten Stoffbahn ab, wobei eine Rakel im Innern der Schablone die Farbpaste durch die Musterstellen der Schablone auf die Stoffbahn drückt.
Nach dem Drucken wird die Stoffbahn auf der *Trockenmansarde* getrocknet, in einem Dämpfer gedämpft, wobei die Farbe ins Faserinnere zieht und dort fixiert wird, auf *Waschmaschinen* nachbehandelt und gespült.
Thermodruck. Die Stoffbahn wird mit einem das gesamte Muster enthaltenden Farbträgerpapier zusammen durch den beheizten Walzenspalt zweiter Kalanderwalzen oder über eine beheizte Trommeloberfläche geführt. Dabei geht der Farbstoff durch Diffusions- und Sublimationsvorgänge bei ≈ 220 °C vom Papier auf das Textilgut über.
Spritzdruck. Durch Farbstrahlen aus über die gesamte Stoffbahnbreite angeordneten Düsen, die einzeln gesteuert werden, wird auf der in geringem Abstand vorbeigeleiteten Stoffbahn das Muster erzeugt.
Hochveredlung (chemische Appretur). Die *Hochveredlung* erzeugt spezielle Gebrauchswerteigenschaften auf Geweben und Gewirken/Gestricken, die vor allem die Pflege verringern und die Benutzungsdauer erhöhen können.
Krumpfechtausrüstung verhindert, daß Gewebe nach dem Konfektionieren beim Waschen einlaufen.
Knitterarmausrüstung mit Kunstharzen bewirkt vor allem bei Zellulosefaserstoff-Erzeugnissen eine Verbesserung der elastischen Eigenschaften und eine Verringerung der Knitterneigung.
Antistatische Ausrüstung ist vor allem für Erzeugnisse aus Chemiefaserstoffen erforderlich, um die beim Tragen auftretenden elektrostatischen Aufladungen abzuleiten.
Spezitex®-Ausrüstung ist ein geschützter Begriff für hochveredelte Textilien der Textilindustrie der DDR. Unter dieser Verbandsmarke werden formstabile, knitterarme, krumpfarme, laminierte, hydrophobe, schmutzabweisende, verrottungsfeste, schwer entflammbare, mottenechte u. a. Stoffe hergestellt.
Waschen. Während der Textilveredlung wird das Textilgut häufig gewaschen, um natürliche oder während der Bearbeitung aufgetretene Verschmutzungen aus dem Textilgut zu entfernen. In der Naßveredlung sind auch aus der vorangegangenen Bearbeitungsstufe noch vorhandene Chemikalien zu beseitigen. Je nach der Art der zu entfernenden Verschmutzung spricht man von einer *Schmutz-* oder *Pigmentwäsche* bzw. von einer *Chemikalien-* oder *Verdünnungswäsche*.
Laminieren, Beschichten, Bondieren. *Laminieren* ist das Aufschäumen von Polyäthylen, Polyurethan u. a. auf die Stoffbahn. Beim *Beschichten* wird eine Gummi- oder Plastpaste auf die Stoffbahn aufgestrichen und durch Vulkanisieren, Gelieren oder Aushärten mit ihr verbunden. Als *Bondieren* bezeichnet man das Verbinden zweier Textilbahnen durch eine dazwischen aufgebrachte Schaumschicht.

19.4.3. Entwässern und Trocknen

Nach der Naßveredlung oder bei technologischer Erfordernis auch zwischen 2 Naßveredlungsstufen, wird das auf dem Stoff und den Faseroberflächen befindliche Wasser aus dem Textilgut durch Quetschen zwischen *Quetschwalzenpaaren*, durch Schleudern in *Zentrifugen* oder durch Absaugen auf *Absaugemaschinen* entfernt. Daran schließt sich der Trocknungsprozeß an.
Am gebräuchlichsten sind *Konvektionstrocknungsmaschinen*, in denen Warmluft aus Düsen senkrecht auf die Stoffbahn aufgeblasen (*Spann-Trocknungs-Fixier-Maschinen*) oder durch die auf perforierten Trommeloberflächen aufliegende Textilgutschicht hindurchgesaugt wird (*Siebtrommeltrocknungsmaschine*). Daneben gibt es noch weitere Konvektionstrocknertypen. Das Trocknen ist ferner möglich durch Berührung mit der Oberfläche beheizter Trommeln (*Kontakttrockner*), durch Strahlung (z. B. *Infrarottrockner*) oder im dielektrischen Feld (*Hochfrequenztrockner*).

19.4.4. Trockenveredlung

In der Trockenveredlung, auch als *mechanische Appretur* bezeichnet, erhält das Textilgut, meist Stoffe in breiter Bahn, nach der Naßveredlung und Trocknung durch mechanische und thermische Behandlung die verkaufsfähige Ausrüstung.
Rauhen ergibt eine flauschige, teilweise filzige Oberfläche mit bestimmter Strichrichtung. Beim Rauhen führt man die Stoffbahn über mehrere sich drehende, mit feinen Häkchen versehene Walzen (*Kratzenrauhmaschine*) oder über eine mit Natur- oder Edelstahlkarden bestückte Trommel (*Kardenrauhmaschine*).
Scheren. Durch Scheren werden die aus der Stoffoberfläche herausragenden Fasern oder Fäden gekürzt (*Polschur*) oder völlig abgeschnitten (*Kahlschur*). Die Stoffbahn wird auf der *Schermaschine* an einem Scherzeug, bestehend aus einem rotierenden Spiralmesser und einem damit eingeschliffenen feststehenden Messer, vorbeigeführt.
Pressen, Kalandern, Mangeln. *Pressen*. Textilbahnen, die nicht kalandert werden können, werden auf *Muldenpressen* um eine rotierende Trommel geführt, die mit einstellbarem Druck auf einer sie teilweise umschließenden feststehenden Mulde aufliegt. Trommel und Mulde sind beheizt.

Kalandern. Dadurch wird das Gewebe geglättet, verdichtet und erhält Glanz. Es können auch spezielle Prägeeffekte erzielt werden. Ein *Universalkalander* hat 4 bis 12 Walzen, die z. T. als beheizte Feingußwalzen, z. T. als mit Baumwolle, Papier oder Jute bezogene elastische Walzen ausgebildet sind.
Mangeln erzielt vor allem auf Wäschestoffen und Inletts eine geschlossene Stoffoberfläche, in der die Fäden nicht plattgedrückt sind. Hierzu läßt man auf jutebezogene Docken aufgewickelte Stoffbahnen unter Druck zwischen 2 beheizten Stahlwalzen rotieren.
Fixieren thermoplastischer Faserstoffe, z. B. Wolle, Chemiefaserstoffe, ist das Stabilisieren von Faser- und Fadenzuständen im Stoffverband. Dadurch wird die Formbeständigkeit verbessert und die Krumpf- und Knitterneigung nahezu beseitigt. Es können auch bestimmte Formen fixiert werden, z. B. für Hüte, Miederwaren, Bekleidungsteile. *Wollgewebe* werden durch Kochwasser bei 100 °C fixiert (*gebrannt*). *Chemiefaserstoffe* werden mit Sattdampf im Autoklaven, am häufigsten aber mit Heißluft in *Spann-Trocknungs-Fixier-Maschinen* fixiert, wobei je nach Faserstoff die Fixiertemperatur zwischen 188 und 200 °C liegt. Gleichzeitig wird die endgültige Breite der Stoffbahn eingestellt. Das Fixieren ist damit der abschließende Arbeitsgang der Trockenveredlung für Erzeugnisse aus Chemiefaserstoffen.
Dekatieren (Endappreturfixage) von Woll- und Wollmischgeweben hat das Ziel, dem Stoff Griff und Glanz zu verleihen und das Einlaufen zu verhindern. Der Stoff wird dazu mit einem Mitläufertuch auf eine perforierte Trommel gewikkelt und in diesem Wickel von Dampf durchströmt. Neben diesen diskontinuierlich arbeitenden *Preßglanz-* oder *Finish-Dekatiermaschinen* werden zunehmend *Kontinue-Dekatiermaschinen* eingesetzt.

19.4.5. Lösungsmittelveredlung

In der Lösungsmittelveredlung werden anstelle des Wassers organische Lösungsmittel benutzt. Gegenwärtig wird am häufigsten Perchloräthylen (Tetrachloräthen, C_2Cl_4) verwendet. Dieses organische Lösungsmittel, das wenig gesundheitsschädlich (Gefährdungsgruppe III), nicht entflammbar und nicht explosiv ist, besitzt ein außerordentlich hohes Fettlösevermögen, benetzt die Fasern wesentlich besser als Wasser und löst eine Reihe von Textilveredlungsprodukten, die im Wasser nur emulgiert werden können. Zum Verdampfen des Lösungsmittels werden nur $^1/_{10}$ der Energiemengen benötigt, die zum Verdampfen einer gleichgroßen Menge Wasser erforderlich sind. Damit können durch die Lösungsmittelveredlung vor allem der Wasser- und Energieverbrauch gesenkt werden. Die hohe Benetzbarkeit der Faser durch das Lösungsmittel wird zum Reinigen der Faser von Wachsen, Ölen und Fetten genutzt. Ferner werden erst durch den Einsatz organischer Lösungsmittel Kombinationen von Veredlungseffekten möglich, indem man die unterschiedliche Löslichkeit von Chemikalien in Wasser und organischen Lösungsmitteln ausnutzt.
Die Lösungsmittelveredlungsanlagen erfordern einen hohen anlagentechnischen Aufwand, da gekapselte Anlagen mit einem geschlossenen Lösungsmittelkreislauf erforderlich sind. Trotzdem beginnt sich die Lösungsmittelveredlung durchzusetzen. Moderne Anlagen reinigen, appretieren und trocknen die Stoffbahn in einem Arbeitsgang. Das verschmutzte Lösungsmittel wird durch Destillation regeneriert, das beim Trocknen verdunstete Lösungsmittel wird durch Kondensation und Adsorption zurückgewonnen.

19.4.6. Aufmachung

Aufmachung sind alle Schlußarbeiten der Textilveredlung, durch die die veredelte Ware in die vom Abnehmer geforderte Form gebracht wird. Die Stoffbahnen werden auf *Meß-Dublier-Wikkel-* bzw. *Meß-Dublier-Legemaschinen* dubliert (längs der Mittellinie zusammengelegt), gewikkelt oder in Falten gelegt und durch geeichte Meßeinrichtungen in der Länge gemessen.

19.5. Bekleidungsfertigung

Die industrielle Herstellung von Bekleidungserzeugnissen ist eine komplexe Aufgabe mit wesentlich abweichenden Verfahrensparametern und -merkmalen, gekennzeichnet durch:
- Einsatz unterschiedlichster textiler Flächen und deren Kombination,
- stark heterogene Erzeugnisstruktur,
- die Vielzahl verschiedener Größensysteme und Bekleidungsgrößen,
- geringe Formkonstanz der Teile,
- den großen Einfluß der Mode,
- Komplexität des Gebrauchswerts.

19.5.1. Technisch-technologische Vorbereitung des Produktionsprozesses

Die Bekleidungserzeugnisse nehmen als Finalprodukte in der Sphäre der individuellen Konsumtion eine gewisse Sonderstellung ein, neben der Notwendigkeit ihrer effektiven Serienfertigung gehören sie zur bewußt gestalteten Umwelt. Die Erzeugnisentwicklung hat folglich

Einfluß auf das individuelle und gesellschaftliche Kulturniveau, d. h., es wirken neben der wissenschaftlich-technischen Entwicklung auch die Veränderung der Lebensbedingungen und Gewohnheiten der Menschen. Die Ausgangsbasis für die optimale Entwicklung von Bekleidungserzeugnissen sind quantifizierbare Aussagen zu den Einflußfaktoren der Erzeugnisentwicklung als Voraussetzung für die Optimierung von Mode, Bedarf und Ökonomie. Integrierter Bestandteil dieser Aufgabe ist der Gebrauchswert des Erzeugnisses, d. h. die Gesamtheit der für den Verbraucher nützlichen Eigenschaften des Bekleidungserzeugnisses, beispielsweise Gebrauchstüchtigkeit, Repräsentationsgüte, Verarbeitung, Pflegeeigenschaften.

Größensysteme. Um Bekleidungserzeugnisse mit höherem Gebrauchswert unter den Bedingungen einer wirtschaftlichen Fertigung herzustellen, ist eine Reduzierung der Streubreite und Einteilung in Gruppen der unterschiedlichsten verschiedenen Körpermaße erforderlich. In Abweichung von der individuellen Fertigung wird jedes Körpermaß mit bestimmten Toleranzen beaufschlagt. Eine *Größe* ist folglich die Zusammenstellung der wichtigsten Körpermaße für eine Personengruppe, die ähnliche Körpermaße besitzt. Ein *Größensystem* wird aus einer vom ökonomischen und vom Gebrauchswert abgeleiteten Anzahl von Größen gebildet. Entscheidende Grundlage für die Qualität und Rentabilität eines Größensystems sind die *Hauptmaße*, wie Körperhöhe, Brustumfang und Gesäßumfang, sowie deren Intervallbreite und Kombinationsmöglichkeit. Die angegebenen Kriterien sind entscheidend für die Paßform des Bekleidungserzeugnisses, d. h., mit zunehmender Anzahl von Hauptmaßen bzw. bei Verringerung der Intervallbreite verbessert sich die individuelle Paßform. Daraus ergibt sich ein Widerspruch zur wirtschaftlichen Serienfertigung. Bei der Erarbeitung von Größensystemen muß eine Vielzahl von Forderungen optimiert werden. Größensysteme werden für Damen-, Herren- und Kinderbekleidung in den verschiedenen Sortimenten, wie Oberbekleidung, Trikotagen und Wäsche, angewandt.

Bekleidungskonstruktion. Darunter wird die Konstruktion der geometrischen Abmessungen des zweidimensionalen Bekleidungseinzelteils, wie Vorder-, Rückenteil, Ärmel u. a., als Voraussetzung für die dreidimensionale Form des Bekleidungserzeugnisses verstanden.

Auf der Basis der standardisierten Grundkonstruktion, dem *Grundschnitt*, werden spezifische *Modellkonstruktionen* erarbeitet, die durch entsprechende Zusatzinformationen, wie Nahtzugaben und Markierungen, als fertigungstechnische Hinweise zum *Produktionsschnitt* ausgebaut werden. Die verschiedenen Bekleidungsgrößen entstehen durch *Gradation*, d. h. Vergrößern und Verkleinern der Schnitteile.

Die Gradation wird rationell durchgeführt, indem die Veränderungen der einander entsprechenden Konstruktionspunkte (*Stellpunkte*) entweder durch einen Vektor oder durch Veränderungswerte (*Sprungbeträge*) in 2 Koordinaten angegeben werden. Die Sprungbeträge ergeben sich aus den Körpermaßdifferenzen. Für die Ermittlung der Sprungbeträge wirkt sich günstig aus, daß die Maßdifferenzen von Größe zu Größe innerhalb eines Größensystems konstant sind.

Die Körpermaßdifferenzen allein ermöglichen nur bedingt eine vergleichbare Aussage der Sprungbeträge, dazu ist die Festlegung einer Bezugsbasis erforderlich. Diese Bezugsbasis wird als *Gradationskonstante* bezeichnet. Gradationskonstanten sind nach ökonomischen Kriterien ausgewählte Linien bzw. Stellpunkte im Schnitt als Voraussetzung für die Ermittlung der Sprungbeträge auf der Basis der Körper- bzw. Konstruktionsmaße.

Mit der Bekleidungskonstruktion werden entscheidende Voraussetzungen zur Erhöhung des Mechanisierungs- und Automatisierungsgrades insbesondere des Verfahrens Nähen geschaffen.

Verfahren der Schnittbildplanung bilden unter Beachtung bestimmter Voraussetzungen, wie Liefervertrag, Art des textilen Stoffs, mögliche Größenkombination, effektive Lagenbreite und -länge, die entscheidende Grundlage für einen ökonomisch gerechtfertigten Materialeinsatz, d. h. einen hohen Materialnutzungsgrad.

Bei der *Schnittbildplanung im Spiegelbild* werden alle Schnitteile so aufgelegt, daß aus einer Materialbahn das komplette Erzeugnis geschnitten werden kann, d. h. alle Teile, auch die spiegelbildlichen (Symmetrieteile), liegen auf der gleichen Bahn.

Bei der *Schnittbildplanung als einseitige Auflage* erfolgt die Komplettierung des Erzeugnisses durch 2 Materialbahnen, d. h. die zueinander gehörigen Symmetrieteile liegen übereinander.

Beide Verfahren bieten für die Auflage der Schnitteile folgende Möglichkeiten:

1. Auflage der Schnitteile in einer Richtung;
2. um 180° gedrehte Auflage der Schnitteile für jeweils ein Erzeugnis;
3. um 180° gedrehte Auflage einzelner Schnitteile unabhängig von der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Größe.

Die Auswahl der Varianten der Schnittbildplanung ist abhängig von bestimmten Merkmalen des eingesetzten textilen Stoffs, z. B. Oberflächenbeschaffenheit und Ausrüstung, Dessinierung, Rapportgröße, Symmetrie bei Rapport und Dessin. Die wesentlichsten Faktoren zur Beeinflussung des Materialverbrauchs mit Hilfe der Schnittbildplanung sind: Modellform, Art des textilen Stoffs, Größensortiment, Größenkombination, Modellkombination, Stückelung, Nahtverlegung, Lagenlänge und -breite. Die Varian-

ten der Schnittbildplanung bedingen die Anwendung bestimmter Lageverfahren im Teilprozeß Trennen.

19.5.2. Teilprozesse der Bekleidungsfertigung

Trennen. In diesem Teilprozeß, dem *Zuschnitt*, werden die textilen Stoffe zu Bekleidungsteilen geschnitten.

Legeverfahren. Das textile Flächengebilde wird zum Trennen in die verschiedenen Bekleidungsteile zu mehreren Lagen nach verschiedenen Legeverfahren übereinandergelegt. Die Auswahl des optimalen Verfahrens erfolgt auf der Basis der Schnittbildplanung in Abhängigkeit von Gebrauchswertanforderungen an das Erzeugnis und den Eigenschaften und Merkmalen des textilen Stoffs.

Unter Berücksichtigung der Schnittbildplanung erfolgt die Auswahl der Legeverfahren nach den Güteanforderungen an das Erzeugnis und der Oberflächenbeschaffenheit der eingesetzten textilen Flächengebilde in Abhängigkeit von den Güteanforderungen und dem Verwendungszweck. Die Anzahl der übereinanderliegenden Lagen ist u. a. von der Art des textilen Flächengebildes abhängig.

Das *Legeverfahren Rechts-Links* wird für textile Flächengebilde mit symmetrischen Bekleidungsteilen angewendet.

Das *Legeverfahren Rechts-Rechts* hat die niedrigste Produktivität aller Verfahren, bedingt durch die notwendige Drehung jeder 2. Lage (rechte Seite auf rechte Seite). Es wird bei asymmetrischer Dessinierung eingesetzt. Bei Farbabweichungen innerhalb des Stoffballens ist das Verfahren nicht anwendbar.

Zick-Zack-Legen wird angewendet bei nichtrichtungsbetonter Oberfläche textiler Flächen bzw. Erzeugnissen, bei denen dieser Umstand nicht von Bedeutung ist. Es ist das Legeverfahren mit der höchsten Produktivität, da immer die gleichen Seiten aufeinander liegen, aber nicht jede Lage getrennt wird.

Das *Stufenlegen* hat nur einen geringen Materialnutzungsgrad und wird für das Legen von Kleinserien und Restelagen ökonomisch eingesetzt.

Trennverfahren. *Mechanisches Schneiden* wird manuell mit *Rund-*, *Stoß-* oder *Bandmessern* durchgeführt. Die Verwendung von Rund- und Stoßmessern erfolgt in der Regel zum Grobtrennen des Lagenblocks in transportable Einheiten, während mit dem Bandmesser der Feinschnitt entlang der vorgegebenen Schnittkontur erfolgt. Das mechanische Schneiden, gekoppelt mit hochproduktiven Legemaschinen und entsprechenden Transporteinrichtungen, wird als universelles Verfahren in der gesamten Bekleidungsindustrie eingesetzt (Abb. 19.5.2-1).

Stanzen ist ein Verfahren zur Herstellung formkonstanter Schnitteile aus einer Stoffbahn oder -lage. Den Vorteilen des Verfahrens, wie hohe Form- und Maßgenauigkeit, hohe Produktivität, gute Verkettungsmöglichkeiten, stehen Nachteile, wie hohe Investitions- und Werkzeugkosten, geringe Lagenhöhe, gegenüber. Ein ökonomischer Einsatz ist deshalb nur bei Großserien möglich. In der Bekleidungsindustrie wird das Verfahren deshalb vor allem für formkonstante Kleinteile, wie Taschen und Patten, eingesetzt.

Technologische Einflußfaktoren auf den Stanzvorgang sind Lagenhöhe, Schnittlänge, Form und Beschaffenheit der Stanzmesser und die Beschaffenheit des textilen Stoffs. Von besonderer Bedeutung ist die Konstruktion der Stanzmesser (Vermeidung von Seitenkräften F_s), die sowohl entscheidend für die Genauigkeit der Schnitteile als auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens selbst ist.

Kontaktlose Trennverfahren ermöglichen die Führung des Schneidelements in beliebiger Richtung sowie die automatische Steuerung und Programmierung des Zuschneideprozesses.

Alle kontaktlosen Verfahren befinden sich noch im Stadium der Forschung und Entwicklung. Das bekannteste Verfahren ist das *Lasertrennen*. Der industriellen Anwendung stehen z. Z. noch folgende Fakten entgegen:

– ungenügender energetischer Wirkungsgrad,
– starke Reflexion der Lichtstrahlen,
– hoher apparativer Aufwand,
– begrenzte Anwendbarkeit,
– hohe Wartungs- und Instandhaltungskosten,
– ungenügender Arbeitsschutz.

Fügen. Der Teilprozeß Fügen der Bekleidungsfertigung wird durch die Arbeitsverfahren Nähen, Schweißen und Kleben charakterisiert. Im Teilprozeß werden die zugeschnittenen ebenen Schnitteile zum dreidimensionalen Erzeugnis gefügt.

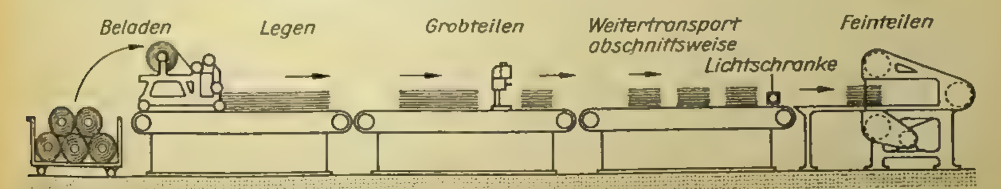


Abb. 19.5.2-1 Zuschneideanlage

Nähen. Das Verbinden der Schnitteile erfolgt durch Stiche bzw. Nähte.
Ein *Stich* ist eine Nähfadenverschlingung im Nähgut, die in gleicher Form wiederholt und aneinandergereiht eine *Stichreihe* ergibt. Dabei kann ein durch das Nähgut mittels Nadel geführter Nähfaden mit sich selbst verschlungen werden, oder mehrere Nähfäden, von denen mindestens einer durch das Nähgut geführt wird, werden miteinander verschlungen. Die Umschlingung kann auf der Ober-, Unterseite oder im Nähgut liegen. Sie wird bestimmt durch:
- Konstruktion und Anzahl der Nadeln,
- Konstruktion, Funktion und Anzahl der Greifer,
- Kombination von Nadel und Greifer,
- Anordnung von Nadel und Greifer.

Die Stichklassen bzw. -arten sind standardisiert in:
Stichklasse 100 – Einfachkettenstich
Stichklasse 300 – Doppelsteppstich
Stichklasse 400 – Doppelkettenstich
Stichklasse 500 – Überwendlichstich
Stichklasse 600 – Überdeckstich
Die 2. und 3. Stelle der Ziffern kennzeichnet die spezielle Stichart.
An der Stichbildung sind in der Regel die Elemente *Nadel*, *Greifer*, *Fadenhebel* und *Nähguttransport* beteiligt.
In Abhängigkeit vom geforderten Gebrauchswert werden für das Nähen von Bekleidungsteilen

Nadelfaden
Stoffteile
Spulenfaden

Abb. 19.5.2-2 Stichbild des Doppelsteppstichs

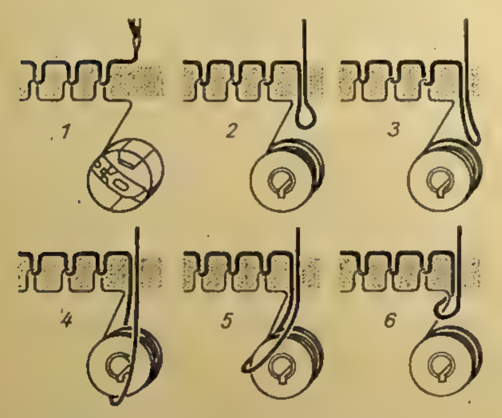


Abb. 19.5.2-3 Phasen der Stichbildung beim Doppelsteppstich

bzw. -erzeugnissen die verschiedensten Sticharten eingesetzt.
Einfachkettenstich. Die Bildung dieses Stichs erfolgt mit einem Nadelfaden ohne Greiferfaden, wobei der Nadelfaden von der Rolle abgezogen wird. Der Greifer ist als rotierender Flügelgreifer bzw. als oszillierender Hakengreifer ausgebildet. Die Stichart wird eingesetzt zum Heften von Bekleidungsteilen, bei Anwendung des Hakengreifers auch als Mehrliniennaht (bis 24 Stichreihen nebeneinander).
Bei Einsatz eines *Gabelgreifers* (Sonderform hinsichtlich Formgebung und Bewegungsablauf) erfolgt die Anwendung als *Blindstich* zum Säumen und Pikieren.
Doppelstepp-Geradstich (Abb. 19.5.2-2). Die Bildung dieser Stichart erfolgt mit einem Nadel- und einem Spulenfaden. Abb. 19.5.2-3 zeigt die Phasen des Stichbildungsvorgangs:
- Eingriff des Doppelumlaufgreifers in die durch die spezifischen Reibungsverhältnisse an der Nadel entstandene Nadelfadenschlinge
- Weitung der Schlinge und Führung um die Spulenkapsel,
- Abzug des Nadelfadens,
- Anzug der Fadenverschlingung und Nachzug des Nadelfadens um den Betrag des Verbrauchs.

Der Doppelsteppstich ist nahezu universell anwendbar, insbesondere als Befestigungsnaht bei der Verarbeitung von gewebten textilen Stoffen.
Aufgrund der einfachen Verschlingung der Nähfäden ist die Dehnbarkeit gering. Ohne Zerstörung der Fäden ist keine Auflösung möglich.
Doppelstepp-Zickzackstich erhält man durch ein wechselseitiges Versetzen des Nadeleinstichs. Diese Stichart hat in Abhängigkeit von der Stichlänge und der Überstichbreite eine größere Dehnbarkeit als der Geradstich.
Die Anwendungsmöglichkeiten sind sehr vielseitig, z. B. beim Sticken, Bandeinfassen, Spitze aufnähen, Umstechen von Schnitteilen, Verbinden von Einlageteilen, als Knopflochstich für Wäscheknopflöcher.
Doppelkettenstich (Abb. 19.5.2-4). Der Doppelkettenstich wird mit einem Nadel- und einem Greiferfaden gebildet. Die doppelte kettenähnliche Verschlingung der Fäden, die auf der Unterseite des Nähguts sichtbar ist, entsteht durch die Wechselwirkung der Nadel mit dem dreidimensional oszillierend bewegten Greifer. Dieser greift in die Nadelfadenschlinge ein und die Nadel sticht durch das Greiferfadendreieck (Abb. 19.5.2-5). Infolge der möglichen Verlängerung der Verschlingung des Greiferfadens ist der Kettenstich bis 15 % dehnbar. Die Dehnbarkeit bestimmt wesentlich das Einsatzgebiet. Er wird z. B. für Nähte an Trikotagen angewendet.
Im Vergleich zum Doppelsteppstich wird bis zu 100 % mehr Faden verbraucht. Insbesondere Nähautomaten haben eine höhere Produktivität, weil kein Spulenwechsel nötig ist.

Überwendlichstich (Abb. 19.5.2-6). Der Dreifaden-Überwendlichstich wird mit einer Nadel und 2 Greiferfäden gebildet. Die Greifer führen dabei eine oszillierende Bewegung aus und sind leicht ballig ausgeführt, damit ein Eingriff der Nadel in die Obergreiferfadenschlinge und des Obergreifers in die Untergreiferfadenschlinge erfolgen kann (Abb. 19.5.2-7). Der Überwendlichstich ist sehr dehnungsfähig und wird zur Schnittkantenbefestigung und zum Verbinden von Teilen aus Gewirken und Gestricken eingesetzt.

Überdeckstich (Abb. 19.5.2-8). Die Bildung des Überdeckstichs erfolgt analog zu der des Doppelkettenstichs. Es werden dabei 2 und mehr Nadeln eingesetzt. Mit dem Überdeckstich werden Trikotagen gesäumt und angerändert.

Nahtklassen. Eine Naht ist das Ergebnis einer an Werkstoffteilen oder einem Werkstoffteil erfolgten Fügung, Verzierung oder Befestigung von Schnittkanten durch ein technisches Verfahren, wie Nähen, Kleben oder Schweißen.

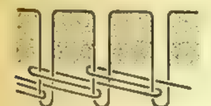


Abb. 19.5.2-4 Stichbild des Doppelkettenstichs

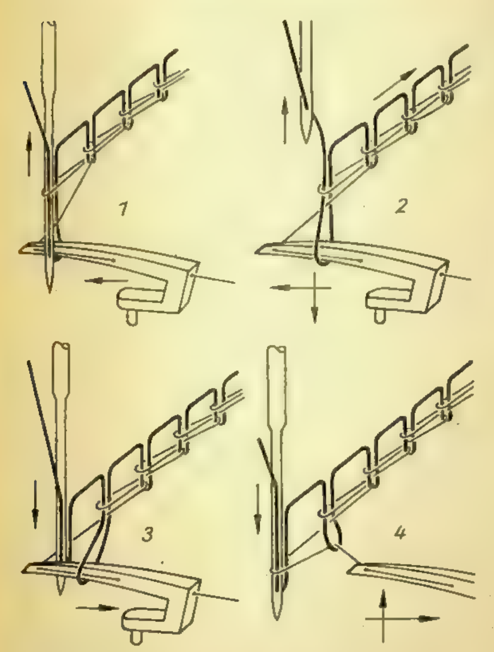


Abb. 19.5.2-5 Phasen der Stichbildung beim Doppelkettenstich

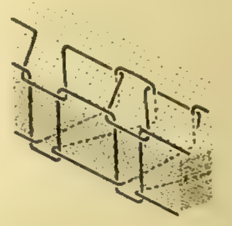


Abb. 19.5.2-6 Stichbild des Dreifaden-Überwendlichstichs

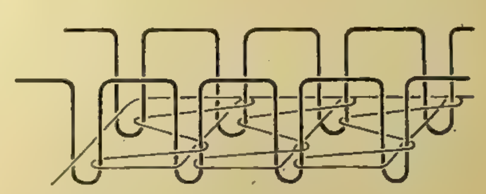


Abb. 19.5.2-8 Stichbild des Zweinadel-Dreifach-Überdeckstichs

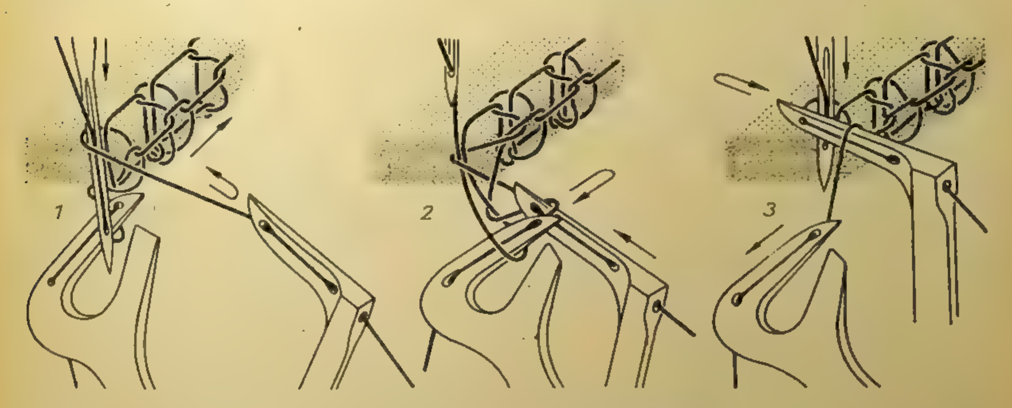


Abb. 19.5.2-7 Phasen der Stichbildung beim Dreifaden-Überwendlichstich

Die Benennung der Naht erfolgt nach den Hauptkriterien Stichart, Anzahl der Teile, Lage der Stoffteile zueinander im Nahtbereich, Art der Stoffaltung.
Die Nähte werden in Nahtklassen und -arten unterteilt, wobei die Gebrauchseigenschaften einer Naht von der Gebrauchstüchtigkeit, der Repräsentationsgüte und den bekleidungshygienischen Eigenschaften bestimmt werden. Diese resultieren aus Einflußfaktoren, wie Nahtfestigkeit, -dehnung, -ausreißfestigkeit, -verlauf, -kräuselung, Stichbild, Luftdurchlässigkeit, Wasserdichtheit u. a.
Folgende Nahtklassen werden unterschieden:
Nahtklasse 1000 – ungefaltete(s) Teil(e)
Nahtklasse 2000 – ungefaltete(s) Teil(e) mit Litze, Paspel, Band, Schnur o. ä.
Nahtklasse 3000 – gefaltete(s) Teil(e)
Nahtklasse 4000 – gefaltete(s) Teil(e) mit Litze, Paspel, Band, Schnur o. ä.
Nahtklasse 5000 – eingefaßte(s) Teil(e)
Nahtklasse 6000 – eingefaßte(s) Teil(e) unter Mitführung von Litze, Paspel, Band, Schnur o. ä.
Nahtklasse 7000 – Schlauch
Nahtklasse 8000 – Schlauch mit Litze, Paspel, Band, Schnur o. ä.
Jede Nahtart wird mit einer 4stelligen Zahl gekennzeichnet, deren 1. Stelle die Nahtklasse, die 2. Stelle die Anzahl der verarbeiteten Werkstoffteile und 3. und 4. Stelle die Zählnummer angeben.
Die Herstellung der verschiedenen Naht- und Sticharten erfolgt durch eine Vielzahl von *Universal-* und *Spezialnähmaschinen*. Besondere Bedeutung kommt dabei der Entwicklung und dem Einsatz von hochmechanisierten Einzelarbeitsplätzen und automatisierten Nähmaschinen (*Nähautomaten*) für bestimmte Arbeitsgänge zu. Die Entwicklung zur Automatisierung der Bekleidungsfertigung mittels *Nähtransferstraßen* hingegen ist nur an Einzelbeispielen möglich und damit z. Z. nicht ökonomisch.
Das Nähen wird auch in den nächsten Jahrzehnten das dominierende Verfahren des Teilprozesses Fügen sein.
Schweißen zur Verbindung der Bekleidungsteile erfolgt innerhalb der Warmbildsamkeit der Berührungsflächen oder mittels eines schweißbaren thermoplastischen Stoffs. Es werden die Verfahren Erwärmungs-, Hochfrequenz- und Ultraschallschweißen eingesetzt, wobei kontinuierlich oder taktmäßig gearbeitet werden kann. Das Einsatzgebiet ist infolge der unterschiedlichen Anteile an schweißbarem Material und nicht immer ausreichendem Gebrauchswert der Naht stark eingegrenzt.
Beim *Erwärmungsschweißen* werden die zu schweißenden Flächen gegen ein Heizelement gedrückt oder in den Bereich der Strahlungswärme gebracht. Nach Erreichen der erforderlichen Temperatur wird die Verbindung durch Druck herbeigeführt. Beispiele sind das *Heizkeil-* und das *Wärmeimpulsschweißen*. Erwärmungsschweißen ist kostengünstig, bietet die Möglichkeit zur Maschinenverkettung, erzielt eine gute Nahtqualität, ist jedoch nur für dünne Materialien einsetzbar.
Beim *Hochfrequenzschweißen* werden die zu verbindenden textilen Stoffe unter Druck dielektrisch erwärmt. Die Vorteile des Verfahrens sind die gleichzeitige Ausführung mehrerer Arbeitsgänge, hohe Maßgenauigkeit und eine kräuselfreie Naht. Dem stehen hohe Investitionskosten, materialabhängiger Einsatz, geringe Dehnung und Elastizität der Naht sowie hohe Wartungskosten gegenüber.
Das *Ultraschallschweißen* wird für Materialien mit thermoplastischen Eigenschaften, insbesondere für kurze unkomplizierte Nähte, z. B. Knopflöcher, angewendet. Das Material wird durch die Schwingungsabsorption bis zur erforderlichen Schweißtemperatur erwärmt.
Kleben kann bei allen textilen Stoffen, die aus den Faserstoffen Wolle, Baumwolle, VIF-Stoffen, texturierten synthetischen Faserstoffen und deren Mischungen bestehen, angewendet werden. Ungeeignet sind Flächengebilde aus Regeneratseide, synthetischer Seide und sehr dünne Stoffe. Der Kleber kann mit *Klebefäden* für linienförmige Verklebungen bzw. für flächenförmige Verbindungen als *Klebetextilie*, auf denen sich in feinster Verteilung thermoplastischer Klebstoff befindet, oder als *Klebefolie* aufgebracht werden. Das flächenförmige Verkleben wird als Fixieren (Front- oder Formfixieren) bezeichnet.
Frontfixieren ist das zweidimensionale Verkleben mehrerer textiler Flächen, z. B. Oberstoff und Einlage des Sakkovorderteils, Kragen, Manschetten u. a. Die Qualität der Verbindung wird entscheidend von der Genauigkeit der Vorgabe und Einhaltung der technologischen Parameter Druck, Temperatur und Zeit sowie der Abstimmung der Klebetextilien mit dem Oberstoff bestimmt.
Formfixieren verbindet das Kleben von textilen Stoffen mit einer dreidimensionalen Verformung des Oberstoffs und der Einlage unter Wärmeeinfluß und Druck. Das Verfahren ist infolge nicht immer ausreichender Verarbeitungsqualität trotz hoher Produktivität nur bei Übereinstimmung der entscheidenden Materialkennwerte der textilen Flächen anwendbar.
Formen beinhaltet die Verfahren Bügeln und Formfixieren (s. o.).
Durch das *Bügeln* werden die Voraussetzungen zur Weiterverarbeitung bestimmter Bekleidungsteile, z. B. Zwischenbügeln von Kragen, geschaffen bzw. die endgültige Formgebung des Bekleidungserzeugnisses erreicht. Die technologischen Parameter sind Feuchte, Wärme, Druck und die Dauer der Bearbeitung, die dem Material entsprechend variiert werden.

Die Textilprüfung dient in der Hauptsache der Überwachung des Produktionsprozesses und der Gütesicherung der Halb- und Fertigfabrikate. Sie ist dementsprechend in Eingangs-, Fertigungs- und Endprüfung unterteilt. Bei der *Eingangsprüfung* werden die Roh- und Hilfsstoffe einer Stichprobenprüfung unterzogen, um festzustellen, ob sie den in den Standards oder Lieferbedingungen festgelegten Qualitätsmerkmalen genügen, und wie sie zweckentsprechend verarbeitet werden können. Die *Fertigungsprüfung* dient der Überwachung der Produktionsprozesse, um Fehler und Abweichungen von den Sollwerten zu verhindern bzw. schnellstens beseitigen zu können. Für die meisten Textilien stellt die *Endprüfung* eine vom Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW) vorgeschriebene Pflichtprüfung dar, als deren Ergebnis das Erzeugnis in eine Güteklasse und eine Wahl eingestuft wird (vgl. 21.2.). Die Endprüfung gewährleistet dem Kunden durch das Gütezeichen Sicherheit, daß das textile Erzeugnis den in Beschaffenheitsstandards festgelegten Qualitätsmerkmalswerten entspricht.

Damit die Brauchbarkeit textiler Erzeugnisse im Hinblick auf ihre spätere Verwendung beurteilt werden kann, setzt man bei der Prüfung die Stoffproben und Fertigerzeugnisse Beanspruchungen aus, die denen des praktischen Gebrauchs weitgehend entsprechen. Für die wichtigsten Prüfungen liegen Verfahrensstandards vor, in denen u. a. das Prüfverfahren mit seiner Durchführung, den Geräten und der Auswertung festgelegt ist.

Da sich die Eigenschaften textiler Faserstoffe, Fäden und textiler Stoffe in Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt der Textilien und der relativen Luftfeuchte ändern, müssen zahlreiche Prüfungen bei konstantem Klima von 65% ± 2% relativer Luftfeuchte und 20 °C ± 2 K Raumtemperatur (*Normalklima*) durchgeführt werden.

19.6.1. Prüfung von Faserstoffen und Fäden

Zur Kennzeichnung der Qualität und Beschaffenheit von Faserstoffen werden hauptsächlich deren Feinheit, Länge, Kräuselung, Festigkeit, Dehnung und Elastizität geprüft. Auch an Fäden werden Feinheit, Festigkeit und Dehnung geprüft. Das ist notwendig, weil man z. B. nicht aus dem Produkt auf Faserfestigkeit und der Anzahl der Fasern in einem Garn auf die Garnfestigkeit schließen kann. Die Faserfestigkeit kann in einem Garn nur zu einem Teil ausgenutzt werden, denn viele Fasern zerreißen nicht beim Zugversuch, sondern gleiten nur auseinander. Die Garnfestigkeit hängt in der Hauptsache von dem Reibungskoeffizienten der Faseroberfläche und der die Haftreibung verursachenden Garndrehung ab. Deshalb sind die Drehungsprüfung und auch die Gleichmäßigkeitsprüfung an Fäden wichtig.

Feinheit Tt von Faserstoffen und Fäden, gemessen in tex, drückt man durch den Quotienten aus Masse m und Länge l aus, $Tt = \frac{m}{l}$. Dabei ist 1 tex = 1 g/1000 m. Für sehr dicke Fäden, Vorgarne und Faserbänder wird die Einheit ktex (Kilotex; 1 ktex = 1000 tex) verwendet. Der Zahlenwert von Tt ist um so größer, je dicker ein Faserstoff oder ein Faden ist. Die Feinheit der wichtigsten Faserstoffe ist in der Tab. 19.6.1-1 enthalten. Zur Bestimmung der Feinheit werden Fasern zu einem Bündel vereinigt, parallelisiert, geradegestreckt, gemeinsam auf gleiche Länge geschnitten und anschließend gewogen. Bei Faserstoffen mit rundem Querschnitt, z. B. Wolle, Glasfasern, einige Chemiefaserstoffe, kann deren Durchmesser d (in µm) auf optischem Wege mit Hilfe eines Lanameters gemessen und aus ihm und der Normaldichte ϱ_n (in g/cm³) des Faserstoffs die Feinheit berechnet werden, $Tt = \frac{d^2 \pi \varrho_n}{4 \cdot 10^3}$ tex. Bei Schnellprüfungen schließt man von der Luftdurchlässigkeit eines in einer Meßkammer bestimmten Volumens befindlichen ungeordneten Faserpfropfens bestimmter Masse auf die Feinheit des Faserstoffs. Man macht sich dabei die Tatsache zunutze, daß der Widerstand gegenüber durchströmender Luft um so höher ist, je größer die Gesamtoberfläche des Faserpfropfens und somit die Feinheit des Faserstoffes ist (*Micronaire, Wollfeinheitsprüfer*). Die Feinheit von Fäden prüft man, indem Stränge unter Beachtung einer vorgeschriebenen Vorspannkraft meist auf genau 100 m Länge gemessen und anschließend gewogen werden.

Länge eines Faserstoffs wird durch seine *Stapellänge* ausgedrückt, unter der man die mittlere Länge aller Fasern versteht, die gleich lang oder länger sind als die Fasern mit der häufigsten Länge. Die Stapellänge entspricht somit nicht der mittleren Faserlänge, sondern ist nur etwas kürzer als die maximale Faserlänge (vgl. Tab. 19.6.1-1). Besonders die Länge von Naturfasern ist sehr unterschiedlich und unterliegt einer großen Streuung.

Die Faserlänge kann einzeln an 500 bis 1000 Fasern in gestrecktem Zustand gemessen und statistisch ausgewertet werden. Bei modernen Verfahren wird ein endengeordneter Faserbart optisch-elektronisch oder kapazitiv abgetastet. Aus den Meßwerten errechnet ein Computer die Kenndaten der Faserlänge (*Digitalfibrograf, Almeter*).

Drehungsprüfung. Hierbei wird die den Fäden durch den Spinn- oder Zwirnvorgang erteilte Drehung auf dem *Drehungszähler* festgestellt. Ein Fadenstück wird in den Drehungszähler

eingespannt, entgegengesetzt zum Spinn- bzw. Zwirnprozeß gedreht (z. B. bis zum völlig aufgedrehten Zustand, der bei Seiden und Zwirnen durch die erreichte Parallellage der Fäden bzw. Elementarfäden gekennzeichnet ist) und die Anzahl der Drehungen je Meter Fadenlänge festgehalten. Die Drehungsrichtung, d. h. Z- bzw. S-Drehung, ist aus der Faser- bzw. Elementarfaden- oder Fadenlage an der Fadenoberfläche ersichtlich.

Zugfestigkeit und Dehnung werden bei Trocken- und Naßzugversuchen auf *Zugprüfgeräten* oder *-automaten* gemessen. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, müssen neben dem Normalklima beim Prüfvorgang und dem Angleichen der Proben an das Normalklima die Einspannlänge, Prüfgeschwindigkeit und Vorspannung beachtet werden. Aus dem Zugversuch erhält man die *Reißkraft* F_H in mN. Sie ist die beim Zugversuch gemessene Höchstkraft. Um Fasern oder Fäden unterschiedlicher Feinheit vergleichen zu können, berechnet man aus F_H und Tt die *feinheitsbezogene Reißkraft* R_H in mN/tex $\left(R_H = \frac{F_H}{\mathrm{Tt}}\right)$ (vgl. Tab. 19.6.1-1). *Reißspannung* $\sigma_H = \frac{F_H}{A}$ ist nicht exakt zu ermitteln, da die Querschnittsfläche A im Augenblick des Reißens unbekannt ist. A wird aus dem Anfangsquerschnitt A_0 unter Berücksichtigung der Dehnung ε errechnet $\left(A_0 = \frac{\mathrm{Tt}}{\varrho_n};\ A = A_0 + \frac{1}{1+\varepsilon}\right)$. Die *Nennreißspannung* $\sigma_{N,H}$ wird zum Vergleich von Faserstoffen und Fäden ungleicher Dichte ermittelt. Sie stellt den Quotienten aus der Reißkraft F_H und dem Anfangsquerschnitt A_0 dar ($\sigma_{N,H} = F_H/A_0 = F_H \cdot \varrho_n/\mathrm{Tt} = R_H \cdot \varrho_n$) (vgl. Tab. 19.6.1-1). Falls beim Zugversuch ein Kraft-Längenänderungs-Diagramm mitgeschrieben

Tab. 19.6.1-1 *Faserstoffeigenschaften*

Faserstoff	Länge in mm	Feinheit in tex	Dichte in g/cm³	feinheitsbezogene Reißkraft in mN/tex	Nennreißspannung in MPa	Reißdehnung trocken in %	Hitzebeständigkeit: Erweichungspunkt in °C	Hitzebeständigkeit: Schmelzpunkt in °C
Baumwolle	10... 42	0,14...0,37	1,50...1,55	270...440	410... 660	6...10	wird braun bei 120...150 °C	
Flachs Elementarfaser	20... 50	0,15...0,33	1,45...1,52	300...600	440... 870	3... 5	ähnlich der Baumwolle (gilt für Flachs, Hanf, Jute)	
techn. Faser	100...600	≈ 2,0		400...800	580...1 160	2... 3		
Hanf Elementarfaser	15... 55	0,25...0,42	1,45...1,53	300...600	440... 890	3... 5		
techn. Faser	650...750			400...800	590...1 180	2... 3		
Jute Elementarfaser	1... 5	≈ 0,20	1,42...1,49	300...340	430... 490	1,3		
techn. Faser	200...250							
Ramie	60...260	≈ 1,2	1,50	480...670	720...1 010	2... 3		
Schafwolle	60...250 (400)	0,23...3,7	1,30...1,32	90...180	120... 240	25...45	Festigkeitsverlust bei 100...130 °C	verkohlt bei 205...300 °C
Naturseide entbastet	350 000 bis 1 500 000	0,12...0,17	1,25...1,37	270...400	320... 580	13...31	etwas geringer als Wolle	
Viskosefasern und -elementarfäden	Elementarfäden endlos, Schnittlänge der Fasern 30 ... 120 (gilt für Viskose bis Polyurethan)	0,12...3,3	1,50...1,52	210...240	320... 360	15...23	Festigkeitsverlust bei 150 °C	zersetzt sich bei 175...205 °C
Azetatfasern und -elementarfäden		0,11...3,0	1,29...1,33	120...140	160... 180	25...35	thermoplastisch bei 175...190 °C	260 °C
Kuoxamfasern und		0,12...3,3	1,52	140...170	210... 260	30...40	Festigkeitsverlust bei 150 °C	zersetzt sich bei 175...205 °C
-elementarfäden				150...210	230... 320	10...17		
Polyamidfasern und		0,16...2,2	1,14...1,15	360...620	410... 720	40...70	170	215
-elementarfäden				400...800	460... 930	15...46		
Polyacrylnitrilfasern und -elementarfäden		0,28...0,68	1,14...1,17	220...290	260... 340	25...35	190...220	zersetzt sich bei 300 °C
Polyesterfasern und		0,17...0,88	1,38...1,40	380...600	520... 830	24...55	230...249	256
-elementarfäden				380...850	520...1 200	18...30		
Polyvinylchloridfasern		0,22...0,56	1,42...1,46	100...170	140... 250	24...46	80	210
Polyurethanfasern und -elementarfäden			1,21	54... 72	70... 90		175	250
Glasfasern und -elementarfäden	70...120	0,05...0,20	2,54	540...660	1 370...1 680	3... 4	846	

wird, lassen sich *Reißarbeit* W_H, *massebezogene Reißarbeit* $W_{M,H}$ (Arbeitsmodul) und *volumenbezogene Reißarbeit* $W_{V,H}$ berechnen.

Festigkeit. Je nach Verwendungszweck werden an Faserstoffen und Fäden auch *Scheuer-, Biege-, Schlingen-, Knoten-, Torsionsfestigkeit* u. a. geprüft. Darüber hinaus wird die Widerstandsfähigkeit gegen die Dauerbiegebeanspruchung (zyklisch wiederholte Biegungen um scharfe Kanten mit definiertem Biegewinkel) untersucht.

Ungleichmäßigkeit. Die Verarbeitbarkeit von Fäden und die Repräsentationsgüte daraus hergestellter textiler Stoffe hängt in starkem Maße von der Ungleichmäßigkeit der Fäden ab. Man prüft die *äußere Ungleichmäßigkeit* (Schwankungen in der Dicke bzw. Masse) durch mechanisches oder elektrisches Abtasten. Am gebräuchlichsten ist die kapazitive Abtastung (*GGP Uster, YET*). Aber auch der visuelle Vergleich eines auf kontrastfarbene Tafeln gewickelten Fadens mit einem Vergleichsfoto ist in den Standards vorgesehen. Die *innere Ungleichmäßigkeit* ermittelt man aus den Streuungen der Meßwerte von z. B. Zugversuchen oder z. B. mit Hilfe einer *Universalgarnprüfmaschine*.

19.6.2. Prüfung textiler Stoffe und Erzeugnisse

Die Prüfungen textiler Stoffe sind entsprechend der Beanspruchungen beim praktischen Gebrauch sehr vielgestaltig. Man prüft Zug-, Druck-, Scheuer-, Biege-, Berstfestigkeit (Widerstandsfähigkeit gegen Aufwölben) und entsprechende Elastizitäten, Widerstandsfähigkeit gegen Dauerbeanspruchungen, Zugstellen, und Pillresistenz bei Strick- und Wirkwaren (Pills = Faserknötchen auf der Gestrickoberfläche), Wasser-, Wasserdampf- und Gasdurchlässigkeit, Knitterneigung, Saugvermögen, Wärmehaltung, Hitzebeständigkeit, Maßänderung bei Einfluß von Wasser, Wärme, Chemikalien, Farbechtheit, Lichtechtheit, Wasser- und Chemikalienbeständigkeit, Materialzusammensetzung u. a.

Zugversuch. Hierbei wird ein Stoffstreifen bestimmter Breite und Länge einachsig auf Zug beansprucht. Der Zugversuch gibt nur ungenügenden Aufschluß über das Verhalten des Stoffs beim Gebrauch, da z. B. Kleidungsstücke beim Tragen mehrachsig beansprucht werden. Der *Berstversuch* korreliert wesentlich besser mit der tatsächlichen Beanspruchung. Bei ihm wird ein Stück Stoff mittels Druckluft zu einer Kugelkalotte aufgewölbt und zum Bersten beansprucht. Der Stoff muß mit einer Kunstoffolie abgedichtet werden, damit die Druckluft nicht durch den Stoff hindurch entweichen kann.

Scheuerprüfungen. Je nach dem praktischen Gebrauch des Stoffs werden verschiedene Verfahren angewendet, z. B. mit ebener, gewölbter, gefalteter Probe, Punkt-, Linien-, Flächenscheuerung, verschiedenen Scheuerrichtungen, Belastungen, Vorspannungen, Unterlagen und Scheuermitteln. An konfektionierten Textilien werden die Nahtverbindungen den verschiedensten Prüfungen unterzogen.

Trageversuche. Zur Charakterisierung des Gebrauchswerts reichen die genannten Prüfungen aber nicht aus, da sich im Gebrauch meist Kombinationen mehrerer Belastungen ergeben. Man führt deshalb *Trageversuche* durch und beurteilt den Gebrauchswert nach Zeitpunkt und Art der auftretenden Beschädigungen bei genau festgelegtem Wechsel von Trage- und Reinigungsperioden.

20. Ledertechnik

Die Ledertechnik umfaßt die Herstellung von Leder, Rauchwaren, Synthetiks und Lederfaserwerkstoffen sowie die Verarbeitungstechnik dieser Werkstoffe zu den verschiedenen Finalerzeugnissen. Der wachsende Bedarf an Ledererzeugnissen kann durch das aus tierischer Rohhaut gewonnene Leder nicht in vollem Umfang befriedigt werden. Die „Lederlücke" wird immer vollständiger von hochwertigen Synthetiks geschlossen.

20.1. Leder und Rauchwaren

Leder- und Rauchwaren gehören zu den ältesten Kulturgütern der Menschen. Ihre Verwendung als Schutz gegen Witterung, als Bauteile von Lagerstätten und als Schmuck geht über Jahrtausende zurück. Die Umwandlung der leicht faulenden, rohen, tierischen Haut in einen flexiblen, fäulnisbeständigen Werkstoff mit ausgezeichneten tragehygienischen Eigenschaften gehört damit zu den ältesten Technologien der Menschheit. Leder unterscheidet sich von Rauchware (rauch = griffig, dicht, vollhaarig) im wesentlichen durch die Entfernung des Haarkleids.

20.1.1. Rohstoffe für Leder und Rauchwaren

Häute und Felle. Der medizinische Begriff „Haut" für das den Tierkörper umhüllende Organ wird in der Ledertechnik in Häute und Felle unterteilt. *Felle* sind Häute, die zur Rauchwarenherstellung geeignet sind. Vorwiegend handelt es sich um die Häute kleiner, dichtbehaarter Tiere. Für die Häute großer und unbehaarter Tiere wird die Bezeichnung *Haut* auch als Unterbegriff verwendet. Rohe Häute und Felle (Tab. 20.1.1-1) sind Abfallprodukt der Fleisch-, Milch- und Wollproduktion, ausgenommen die Felle gezüchteter oder gejagter Pelztiere (Nutria, Nerz, Biber, Fuchs, Bisam, Marder, Seehund, Hamster, Otter u. a.) zur Gewinnung edler Rauchwaren sowie die Häute von Reptilien (Schlangen, Echsen) zur Herstellung von Luxusleder.

Als Rohstoffe stehen Rindshäute nach Wert und Menge an erster Stelle, gefolgt von Schweinshäuten sowie Schaf- und Ziegenfellen. Die qualitätsbestimmenden Eigenschaften der Rohware sind vorrangig von der Tierart abhängig. Daneben beeinflussen Alter und Geschlecht der Tiere sowie klimatische Bedingungen die Qualität der Rohware. Außerdem spielt für Pelzfelle der Seltenheitswert eine beachtliche Rolle.

Tab. 20.1.1-1 *Übersicht über die Benennung roher Häute und Felle*

Tierart	Benennung	bevorzugte Verarbeitung
Rind	Kalb-, Mastkalb-, Fresserfell (Jungrindfell)	dünne, leichte Schuh- und Bekleidungsleder, Feinlederwaren, Kalbfelle auch für Rauchwaren
	Farsen-, Ochsen-, Kuh- und Bullenhaut	Schuhoberleder, Sohlen- und Brandsohlenleder, Galanterieleder, technische Leder, auch Bekleidungsleder
Schwein	Schweinshaut (für Verarbeitung zu Leder vorzugsweise nur Schweinshautcroupon)	Bekleidungs-, Galanterie-, Brandsohlen-, Schuhoberleder
Schaf	Schaf-, Lammfell	Rauchwaren bei geeignetem Haarkleid, Bekleidungsleder, Leder für Hausschuhe, Galanterieleder
	Forsche (Lammfell mit leicht geöffneter Locke)	Rauchwaren
	Schmasche (Lammfell mit geschlossener Locke)	Rauchwaren
Ziege	Ziegen-, Zickelfell	dünnes, leichtes Schuh- und Bekleidungsleder, Feinlederwaren, dichtbehaarte kleine Felle auch für Rauchwaren
Pferd	Roßhaut, Fohlenfell	Sohlen- und Brandsohlenleder, Schuhoberleder, Galanterieleder, dicht behaarte leichte Felle auch für Rauchwaren

Flächenmäßige Einteilung der tierischen Haut. Innerhalb einer Haut oder eines Felles bestehen Qualitätsunterschiede, die um so ausgeprägter sind, je größer und älter die Tiere waren. Entsprechend dieser Unterschiede werden die Häute für die Lederherstellung (Abb. 20.1.1-2) und die Felle für die Rauchwarenherstellung (Abb. 20.1.1-3) eingeteilt.

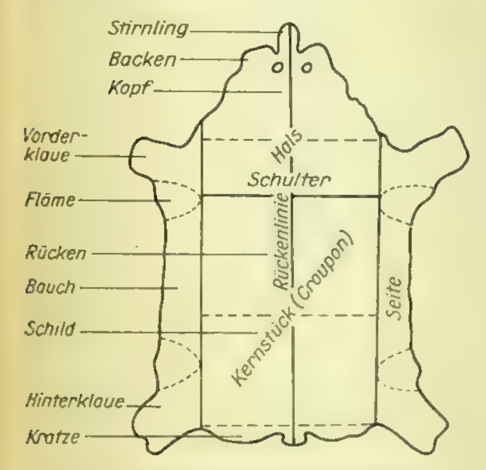


Abb. 20.1.1-2 Einteilung einer Rindshaut

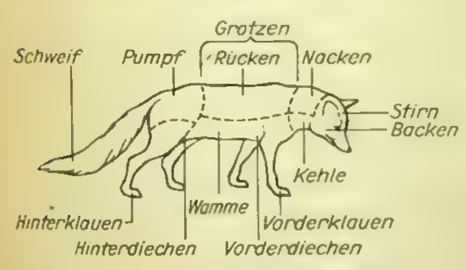


Abb. 20.1.1-3 Einteilung eines Pelzfells

Das *Kernstück* (*Croupon*), das sich beiderseits der Rückenlinie bis zum Hals erstreckt, ist wegen seines gleichmäßigen, dichten Fasergeflechts der wertvollste Hautteil. Am Hals wird die Haut faltiger, schwammiger und dicker, in den Seiten meist dünner als das Kernstück. Die *Flämen* (Weichteile) sind besonders dünne und lockere Hautteile.

Große Häute werden im Laufe der Lederherstellung geteilt, für die Oberlederherstellung längs der Rückenlinie, für die Bodenlederherstellung oft in Kernstück, Hals und Seiten. Werden nur die beiden Seiten abgetrennt, so wird der verbleibende aus Kernstück und Hals bestehende Mittelteil als *Hecht* bezeichnet. Die Felle kleinerer Pelztiere werden bevorzugt als Balg (ohne Längsschnitt) vom Tierkörper abgezogen, um dann dem Rauchwarenhersteller die günstigste Schnittführung zu überlassen. Oft wird für die Herstellung von Rauchwaren auf die Erhaltung von Schweif, Schnauze und Klauen besonderer Wert gelegt.

Vertikalstruktur der Tierhaut. Die Haut besteht aus Epidermis (Oberhaut), Korium (Lederhaut) und Subkutis (Unterhautbindegewebe).

Die *Epidermis* trägt normalerweise weniger als 5 % zur Gesamtdicke der Haut bei. Sie besteht aus dem Eiweiß Keratin, das sich durch einen hohen Schwefelgehalt (≈ 2 %) auszeichnet. Haare, Hufe, Hörner u. a. sind Bildungsprodukte der Epidermis. Das Haarkleid fast aller Pelztiere besteht aus den kürzeren, weichen Wollhaaren (über 95 % des Haarbestands) und den längeren und härteren Grannen- und Leithaaren.

Das *Korium* besteht aus dem Eiweiß *Kollagen*, das ein endloses dreidimensionales Fasergeflecht differenzierter Feinheit bildet. An der Kollagenbildung sind ≈ 20 verschiedene Aminosäuren beteiligt. Durch Aneinanderlagerung der Kollagenmoleküle, jeweils um $^1/_4$ der Moleküllänge versetzt (ähnlich einem Ziegelbauwerk), entstehen feinste fasrige Gebilde, die *Fibrillen*. Fibrillen vereinigen sich zu Fasern und diese zu den mit bloßem Auge gut sichtbaren Faserbündeln. Das Korium gliedert sich bei den meisten Tieren in Papillar- und Retikalschicht. Die *Papillarschicht*, das feinere Fasergeflecht, ist durch zahlreiche Haarwurzeln, Talg und Schweißdrüsen aufgelockert. Gegen die Epidermis schließt sie mit einer besonders zarten Faserschicht, der *Narbenmembran*, ab. Die *Retikularschicht*, aus gröberem Fasergeflecht bestehend, ist in hohem Maße Träger der Festigkeitseigenschaften der Haut.

Das Korium der Schweinshaut läßt keine klare Untergliederung in 2 Schichten erkennen. Seine Eigenschaften entsprechen im wesentlichen einer Papillarschicht. Die Borsten reichen teilweise bis in die Subkutis.

Spezielle Eigenschaften der tierischen Rohhaut. Bei Temperaturen zwischen 60 und 68 °C bricht die gewachsene Kollagenstruktur zusammen, die Haut geht allmählich in Leim über (Kollagen, griech. = Leimbildner). Durch Einwirken von Säure bzw. Alkali quillt die Haut, und hydrolytische Vorgänge bauen das Kollagenfasergefüge bis zu wasserlöslichen Spaltprodukten, z. B. Gelatine, ab.

Durch Trocknen der Haut verkleben die Kollagenfasern zu einem hornartigen transparenten Werkstoff.

Konservierung roher Häute und Felle. Nach dem Abzug vom Tierkörper besteht die Haut zu ≈ 66 Masseprozenten aus Wasser. In diesem Zustand ist sie leicht fäulnisfähig. Da ihre Verarbeitung zu Leder und Rauchwaren zeitlich und räumlich getrennt von der Schlachtung erfolgt, wird sie für längere Zeit, meist für mehrere Monate, konserviert.

Trocknen. Kleintierfelle werden bevorzugt bei mäßiger Temperatur an der Luft getrocknet.
Salzen. Großviehhäute werden meist durch Salzen konserviert. Dazu werden die Häute auf schräg gestellten Paletten ausgebreitet und auf der Fleischseite mit Kochsalz bestreut. Das Salz bewirkt eine Durchdringung der Haut mit gesättigter Salzlösung und gleichzeitig ihre Entwässerung. Die Konservierungsdauer beträgt ≈ 3 Wochen.
Salzlakenkonservierung. Die Häute werden mit gesättigter Kochsalzlösung (Salzlake) behandelt. Die Konservierungsdauer beträgt nur 3 Tage. Der Salzlakenkonservierung geht ein gründliches Säubern und Vorentfleischen der Häute voraus, so daß nach diesem Verfahren gut vorbereitete Rohware für die Lederherstellung zur Verfügung steht.
Kurzzeitkonservierung. Durch die Konzentrierung der Schlachtungen in großen Schlachthöfen gewinnt die Kurzzeitkonservierung an Bedeutung. Die gewaschenen und vorentfleischten Häute werden dazu nur in Desinfektionslösungen gespült, um für wenige Tage fäulnisresistent zu sein. Diese Konservierung setzt jedoch den Anfall genügend gleichartiger Häute in wenigen Tagen voraus und verursacht häufige Transporte zum Verarbeitungsbetrieb.

20.1.2. Lederherstellung

Prozesse der Wasserwerkstatt dienen der Vorbereitung der tierischen Haut für die Gerbung. Sie umfassen im wesentlichen die Entfernung von Epidermis samt Haaren und Subkutis. Für weiche Leder ist außerdem ein Aufschluß des kollagenen Fasergeflechts erforderlich. Die meisten Prozesse werden im wäßrigen System, der *Flotte*, durchgeführt. Die Bearbeitung der Häute erfolgt diskontinuierlich in Partien. Als Arbeitsmittel dienen vorzugsweise *Gerbfässer* und *Haspeln*. Die Auswahl weitgehend gleichartigen Hautmaterials für eine Partie (bis 5 t) ist eine Voraussetzung für die Erzeugung hochwertigen Leders.
Weiche. Durch Weichen in Wasser wird die Haut entkonserviert, von anhaftendem Schmutz befreit und lösliches Eiweiß entfernt.
Der *Epidermisabbau* erfolgt vorwiegend durch den *Äscher*, einem wäßrigen System aus Kalziumhydroxid und Alkalisulfid. Hohe Alkalisulfidkonzentration von ≈ 3 % führt in wenigen Stunden zur völligen Zerstörung von Epidermis und Haaren, geringe Alkalisulfidkonzentration zerstört erst in mehreren Tagen die Epidermis und lockert nur das Haar, das in einem separaten Arbeitsgang auf *Enthaarmaschinen* entfernt und als Sekundärrohstoff aufbereitet wird. Dem haarzerstörenden Äscher wird wegen der hohen Arbeitsproduktivität trotz der Abwasserbelastung meistens der Vorzug gegeben.
Durch Auftragen eines wäßrigen Kalziumhydroxid-Natriumsulfid-Breis (*Schwöde*) auf die Fleischseite der Haut kann innerhalb eines Tages ausreichende Haarlässigkeit erzielt werden. Die Chemikalien dringen durch die Haut bis zu den Haarwurzeln vor. Die Haarentfernung erfolgt wie beim haarerhaltenden Äscher. Die enthaarten Felle müssen zum völligen Epidermisabbau mit einem Nachäscher behandelt werden.
Der Epidermisabbau durch Enzyme (*Enzymäscher*) wird als aussichtsreiche Entwicklung eingeschätzt, weil dadurch die Abwasserbelastung wesentlich reduziert werden kann.
Mechanische Arbeiten der Wasserwerkstatt dienen der vollständigen Entfernung von Epidermis und Subkutis sowie einer eventuell gewünschten Dickenregulierung der Blöße. Die Subkutis wird auf einer *Entfleischmaschine* mit scharfkantigen, V-förmig angeordneten Messern (Abb. 20.1.2-1) entfernt, sofern das nicht schon vor der Konservierung geschehen ist. Zur Entfernung der Epidermisreste (Grund, Gneist) dienen ähnliche *Walzenmaschinen* mit stumpfen Messern, um den Narben nicht zu verletzen. Zur Dickenregulierung werden *Bandmesserspaltmaschinen* verwendet, die die Blöße in ihrer Fläche spalten. Dabei entstehen *Narben-* und *Fleischspalt*, die getrennt weiterbearbeitet werden.
Entkälken ist ist das Entfernen der Äscherchemikalien durch Spülen mit Wasser unter Zusatz von sauer reagierenden Chemikalien, um pH-Wert und Quellungszustand der Blöße auf die folgenden Arbeitsgänge einzustellen.

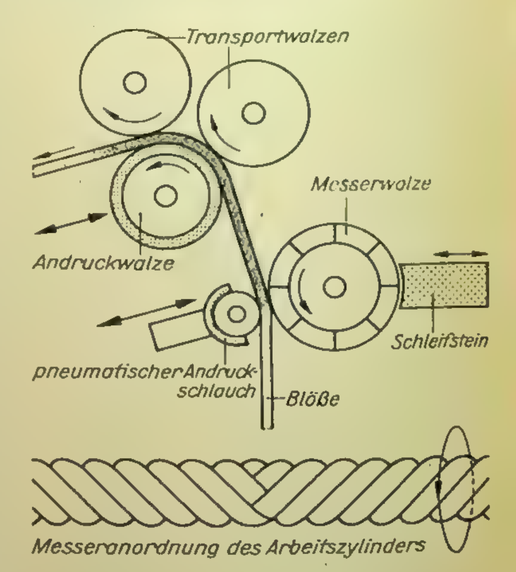


Abb. 20.1.2-1 *Arbeitsprinzip einer Entfleischmaschine*

Beizen erfolgt zur Gewinnung weicher Leder. Das Kollagenfasergefüge wird durch Behandeln mit Enzympräparaten zusätzlich aufgelockert.

Gerben ist das Umwandeln der Haut in einen fäulnisbeständigen Werkstoff mit großer innerer Oberfläche. *Gerbstoffe* sind die gerbenden Bestandteile technisch verwendeter *Gerbmittel* (Tab. 20.1.2-2). Überragende Bedeutung als Gerbmittel haben basische Chrom(III)-verbindungen erreicht. Vegetabilische Gerbmittel werden in Form gerbstoffreicher Extrakte angewendet, die aus gerbstoffärmeren, zerkleinerten festen Gerbmitteln, der *Lohe*, gewonnen werden.

Tab. 20.1.2-2 *Wichtige Gerbmittel*

mineralische Gerbmittel
basische Chrom(III)-Verbindungen
Zirkonverbindungen
Aluminiumsalze
polymere Phosphate
vegetabilische Gerbmittel
Mimosa (Rinde)
Quebracho (Holz)
Eiche (Holz, Rinde)
Kastanie (Holz)
synthetische organische Gerbmittel
Voll-, Hilfs-, Weiß-, Harz-, Fettgerbstoffe

Chromgerbung dient vorzugsweise zur Herstellung weicher und geschmeidiger Leder. Sie wird im *Gerbfaß, Gerbmischer* (Abb. 20.1.2-3) oder *Y-geteilten Gerbautomaten* durchgeführt. Sie beginnt meist in stark saurer Flotte (pH-Wert ≈ 2), der zur Unterdrückung einer Säureschwellung Kochsalz zugesetzt wird. Zur Chromgerbung werden 2 bis 3% der Hautmasse Chromgerbstoff, berechnet als Cr_2O_3, benötigt. Die Umwandlung der tierischen Rohhaut in Leder dauert produktionsmäßig ≈ 8 h.

Vegetabilisch-synthetische Gerbung wird in Gruben und Fässern mit 20 bis 30% Gerbstoff, bezogen auf die Hautmasse, durchgeführt und dient zur Herstellung standiger, fester Leder für Schuhsohlen, Riemen, Taschen usw. Die Gerbzeit beträgt etwa einen Monat.

Sämischgerbung (*Fettgerbung*) dient der Herstellung tuchartig weicher Leder, z. B. Fensterleder. Tran oder synthetische Gerbmittel werden mit einer *Kurbelwalke* in die Blöße eingearbeitet.

Zur Erzielung optimaler Ledereigenschaften ist es oft erforderlich, sowohl Chromgerbstoffe als auch vegetabilische und/oder synthetische Gerbstoffe für die Herstellung einer Lederart einzusetzen.

Zurichten des Leders. Nach dem Gerben ist das Leder noch nicht gebrauchsfähig. Es entspricht im Farbton den verwendeten Gerbstoffen und zeigt oft beträchtliche Dickenunterschiede. Beim Trocknen würde es in einen kaum biegsamen Werkstoff übergehen. Durch die Zurichtprozesse werden dem Leder die erforderlichen Gebrauchseigenschaften gegeben.

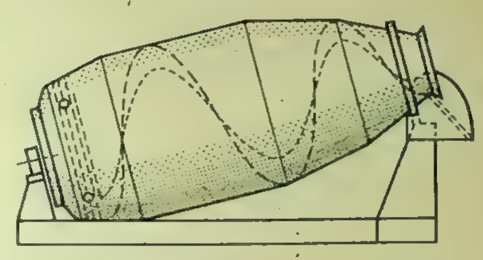


Abb. 20.1.2-3 Gerbmischer

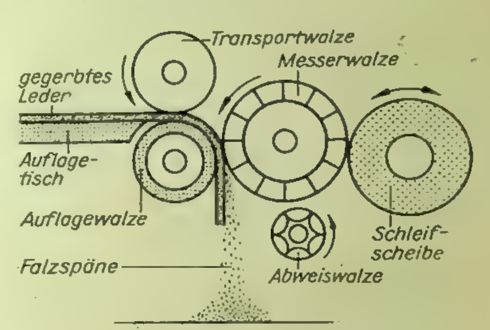


Abb. 20.1.2-4 Arbeitsprinzip einer Falzmaschine

Naßzurichtung. Die Dickenregulierung erfolgt durch Spalten, sofern es nicht bereits in der Wasserwerkstatt geschehen ist, und/oder durch Falzen. Auf *Falzmaschinen* werden durch rotierende Messerwalzen Lederspäne abgehoben (Abb. 20.1.2-4) und damit eine Feinregulierung der Lederdicke erreicht. Im Faß o. a. geeigneten Arbeitsmitteln werden danach ungebundene Gerbstoffe mit Wasser ausgewaschen und *Chromleder* zusätzlich mit schwach basischen Reagenzien entsäuert. Viele Leder werden dann in wäßriger Flotte gefärbt (*Anilinfärbung*) und gefettet (gelickert). Beim *Lickern* nimmt das Leder Fettstoffe aus einer Emulsion, dem *Likker*, auf. Qualität und Quantität der ins Leder eingebrachten Fettstoffe wirken sich entscheidend auf Weichheit und wasserabweisende Eigenschaften des Leders aus. Besonders stark gefettete Leder werden durch Einwalken hochviskoser Fette (*Schmieren*) in teilweise entwässertes Leder oder durch Eintauchen trockener Leder in geschmolzenes Fett erhalten. Hydrophobierte Leder entstehen durch Einarbeiten fettähnlicher, besonders hydrophober Stoffe in das Leder.

Trocknen des Leders. Ein beträchtlicher Teil des Wassers wird mechanisch beim *Abwelken* zwischen rotierenden Walzen abgepreßt. Zur Entfernung des verbleibenden Wassergehalts werden die Leder über Stangen gehängt (*Hänge-*

trocknung) und unter Zuführung trockener, warmer Luft in 8 bis 24 h getrocknet. Durch Hängetrocknung erhält man ein narbenreines, aber welliges Leder (Borkeleder). Als besonders vorteilhaft hat sich die *Vakuumtrocknung* erwiesen, die in wenigen Minuten zu einem ebenen, narbenreinen Leder führt. Luftgetrocknetes Leder hat in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit eine Restfeuchte von ≈ 15%.

Trockenzurichtung. Zur Herstellung weicher Leder werden die während der Trocknung verhärteten Leder befeuchtet und gestollt (erweicht). Zur Entfernung der Stollfeuchte und zur Erzielung einer faltenfreien, ebenen Lederfläche werden die stollfeuchten Borkeleder in gespanntem Zustand nachgetrocknet (*Spannrahmentrocknung*). Durch *Walken* (*Millen*) im rotierenden Faß kann das Lederfasergefüge aufgelockert werden. Hartes Leder wird nach mäßigem Befeuchten gewalzt, um das Lederfasergefüge zu verdichten. *Schleifen* dient der Oberflächenkorrektur des Leders. Die Oberfläche wird tuchartig gerauht (*Velour-*, *Nubukleder*), teilweise werden Narbenfehler beseitigt (*Schleifbox*).

Viele Leder erhalten zur Verbesserung von Aussehen und Strapazierfähigkeit eine Deckfarbenzurichtung. Die Deckfarbe, meist eine wäßrige Dispersion von Pigmenten und Bindemittel, wird in mehreren Arbeitsgängen durch *Einreiben* (*Plüschen*) und egalisierendes *Spritzen*, aber auch durch *Gießen* oder *Drucken* auf das Leder aufgebracht. Die Deckfarbenauftragseinrichtungen sind zur Entfernung von Wasser oder organischen Lösungsmitteln mit einer Trockenstrecke gekoppelt (*Plüsch-* bzw. *Spritzband*). Durch die Deckfarbenzurichtung wird das charakteristische Narbenbild des Leders, sofern nicht bereits durch Schleifen beseitigt, mehr oder weniger verdeckt. Lackleder wird durch Auftragen einer dicken Polyurethanschicht auf vorgefärbte Leder erzeugt.

Die Leder werden den Erfordernissen entsprechend nach den einzelnen Deckaufträgen gebügelt. Falls kein natürlicher Narben mehr vorhanden ist, wird mit beheizten, gravierten Platten ein künstlicher aufgeprägt.

Nebenprodukte der Lederherstellung. Das *Haar* ist Rohstoff für Filze. *Blößenspalte* dienen zur Gewinnung von Foto-, Speisegelatine und verdaulichem Kunstdarm für Wursthüllen. Beim Entfleischen anfallendes Unterhautbindegewebe (*Leimleder*) wird nur noch teilweise zu Leim verarbeitet. Der überwiegende Teil wird zu Futtermittel aufbereitet oder es wird Tierkörperfett daraus gewonnen. *Lederabfälle*, insbesondere von vegetabilisch gegerbtem Leder und Falzspäne, dienen zur Herstellung von Lederfaserwerkstoffen (vgl. 20.3.).

Ledereigenschaften. Leder zeichnet sich durch eine große innere Oberfläche (bis 5 g/m^2) und hydrophile Eigenschaften aus. Es kann bis zu 30% seiner Trockenmasse an Wasser aufnehmen, ohne sich feucht anzugreifen. Bei Reduzierung der Luftfeuchte wird der überwiegende Teil des Wassers leicht wieder abgegeben. Dieses Wassersorptions-Desorptionsvermögen wird von keinem lederähnlichen synthetischen Werkstoff auch nur annähernd erreicht. Leder ist in hohem Maße wasserdampf- und luftdurchlässig. Durch Variation der Herstellungstechnologie kann es in allen Weichheitsabstufungen von biegsam-hart (*Sohlleder*) über weich-sprungelastisch (*Oberleder*) bis zu weich und zügig (*Handschuhleder*) erhalten werden.

Die *Zugfestigkeit* von Leder beträgt ≈ 20 bis 50 N/mm^2. Leder gehört zu den Werkstoffen mit ausgeprägter Anisotropie. Festigkeit und Dehnung sind sowohl von der Entnahmestelle des Prüfkörpers als auch von der Angriffsrichtung der Kräfte abhängig. Unregelmäßigkeiten der Lederoberfläche, die den ästhetischen Gesamteindruck nicht mindern, gelten als Echtheitsmerkmale. *Schweinsleder* ist an den durch den ganzen Lederquerschnitt hindurchgehenden, meist in Dreiergruppen angeordneten Borstenlöchern erkennbar. *Schafleder* ist für seine geringe Festigkeit bekannt.

20.1.3. Rauchwarenherstellung

Rauchwarenzurichtung umfaßt die erforderlichen Arbeitsgänge zur Umwandlung der rohen Felle in fäulnisbeständige, leichte und geschmeidige Rauchwaren. Veränderungen des ursprünglichen Haarkleids sowie die Konfektionierung der Rauchwaren zu Pelzbekleidung werden nicht zur Rauchwarenzurichtung gerechnet.

Wasserwerkstattarbeiten. Das rohe Fell wird in den Arbeitsgängen Weichen, Waschen und Entfetten entkonserviert, gründlich gereinigt und entfettet. Reste des Subkutis werden beim Entfleischen vollständig entfernt. Die anschließende Behandlung der rohen Felle mit Enzymen, Säuren oder hydrotropen Substanzen führt zu einer Vergrößerung der inneren Oberfläche der Haut (Hautaufschluß) und damit zu weicher und zügiger Rauchware.

Gerben. Die zum Gerben vorbereiteten Felle werden im Gerbgefäß mit Säure und Kochsalz sauer gestellt (*gepickelt*) und mit verhältnismäßig geringen Gerbstoffmengen (Formaldehyd, Chrom(III)-verbindungen, Alaun) gegerbt. Werden keine gerbenden Stoffe verwendet, so liegt eine Pseudogerbung vor (*Leipziger Pickel*), die weiche, zügige und gut konfektionierbare Rauchware ergibt, doch in feuchter Wärme rasch zu Festigkeitsverlusten führt.

Fetten hat die Aufgabe, die Lederfasern mit einem dünnen Fettfilm zu umhüllen, um dauerhafte Weichheit und Zügigkeit des Leders zu gewährleisten. Der Fettgehalt beträgt 5 bis 20% der Fellmasse. Nicht gefettete Leder trocknen

aus und verspröden. Die Fettung wird gemeinsam mit der Gerbung, aber auch als selbständiger Arbeitsgang durchgeführt.
Dünnschneiden. Die Lederhaut der meisten Felle ist wesentlich dicker, als für den festen Sitz des Haarkleids erforderlich ist. Dadurch verliert das Fell an Zügigkeit und wird unnötig schwer. Die teilweise Entfernung der Retikularschicht erfolgt bei kleinen Fellen mit der *Dünnschneidemaschine*, großflächige Felle (Kalb, Fohlen) werden gefalzt (vgl. 20.1.1.).
Trocknen. Der Hauptteil des anhaftenden Wassers wird vor dem Dünnschneiden durch Zentrifugieren abgetrennt. Die weitere Trocknung erfolgt vorzugsweise durch Warmluftumlauf im Temperaturbereich zwischen 30 und 50 °C.
Läutern ist das Reinigen des Haarkleids von oberflächlich anhaftendem Schmutz. Die Felle werden mit Hartholzspänen in *Läutertrommeln* gewalkt. Das Läutern gibt dem Haarkleid Glanz und „Spiel" und lockert das Lederfasergefüge auf. Im Laufe der Rauchwarenherstellung können die Felle mehrfach geläutert werden. Durch Schütteln und/oder Klopfen werden die geläuterten Felle von anhaftenden Spänen befreit.
Rauchwarenveredlung. Zur übersichtlichen Gliederung der Rauchwarenherstellung werden alle Arbeitsgänge, die eine Veränderung des ursprünglichen Haarkleids zum Ziele haben, als Rauchwarenveredlung bezeichnet. Im wesentlichen handelt es sich um das Färben und Kürzen des Haarkleids sowie um das Entfernen unerwünschter Grannenhaare. Zurichtungs- und Veredlungsprozesse greifen im Laufe der Rauchwarenherstellung sinnvoll ineinander. Die weitaus überwiegende Zahl aller Felle wird veredelt. Zur naturellen Verarbeitung eignen sich nur Felle mit glänzender Färbung (Zobel, Silberfuchs) oder klarer, wirkungsvoller Zeichnung (Leopard, Ozelot). Felle mit ungleichmäßiger, stumpfer Farbe werden nachgefärbt. Das trifft auch auf Persianerfelle zu, deren Farbe zumindest vertieft wird. Die Veredlungsverfahren ermöglichen die breite Verwendung weniger wertvoller Felle, z. B. Kanin, durch Imitation hochwertiger Felle, z. B. Seal, Ozelot, Wildkatze usw. Die Bezeichnungen solcher Rauchwaren setzen sich aus dem vorangestellten Namen des imitierten Fells und dem nachgestellten Namen des verwendeten Fells zusammen, z. B. Ozelotkanin.
Bleichen. Von Natur aus weiße Felle sind immer etwas gelbstichig. Zur Herstellung gleichmäßig weißer Felle werden sie gebleicht. Eine Bleiche ist auch zur Vorbereitung dunkelfarbiger Felle für die Färbung in hellere Farbtöne notwendig. Durch Einwirkung von vorzugsweise Wasserstoffperoxid in wäßriger Flotte werden die im Haar eingelagerten Pigmente vollständig oder teilweise zerstört.
Färben. Zur besseren Farbstoffaufnahme des Haares werden die Felle vor der Färbung normalerweise mit schwach alkalischen Chemikalien, wie Ammoniak (*Töten des Haares*), und anschließend mit Lösungen spezieller Schwermetallsalze (*Beizen*) behandelt. Für Oxydationsfarbstoffe ist das Beizen des Haares eine Voraussetzung für einen gut haftenden Farblack. Daneben sind Metallkomplexfarbstoffe für die Rauchwarenveredlung von besonderem Interesse.
Das einheitliche Färben geschieht meist in wäßriger Flotte. Andersartige Färbungen der Haarspitzen im Vergleich zur Unterwolle (*Blenden des Haares*) erfolgt dagegen im *Spritz-*, *Streich-* oder *Druckverfahren*. Unter Verwendung von Spezialschablonen sowie im Siebdruckverfahren werden charakteristische Fellzeichnungen, wie Leopard oder Ozelot, aufgebracht.
Scheren heißt das Kürzen der Haare auf die gewünschte Länge. Es wird häufig bei Schaf, Lamm und Nutria angewendet. Bei Römerlamm entsteht erst nach dem Scheren der typische Moiré-Effekt. Zur Erzielung modischer Effekte, wie Rillen und Muster, kann das Haar an diesen Stellen auch bis zum Leder entfernt werden.
Entgrannen oder Rupfen ist das Entfernen der Grannenhaare. Bevorzugt werden grobe, harte (Seal, Nutria) und mißfarbene (Biber) Grannenhaare entfernt, die den Wert der Rauchware mindern. Das Entgrannen wird nach enzymatischer Vorbehandlung der Felle mit *Rupfmaschinen* oder *Rumpeleisen* vorgenommen.
Je nach angestrebtem modischen Effekt können in glattes Haar Locken geprägt oder gelocktes Haar geglättet werden bzw. werden die bereits vorhandenen Haarformen verfeinert.
Rauchwarenkonfektionierung. Die Konfektion der Rauchwaren (*Kürschnerei*) umfaßt das Auswählen, Zuschneiden und Nähen der Felle zu einem Pelzbekleidungsstück. Besonders wichtig ist das Zusammenstellen und Aufeinanderabstimmen der Felle hinsichtlich Farbe, Glanz, Haarlänge und -richtung sowie der Lockeneffekte. Manche Fellarten erfordern ein getrenntes Verarbeiten des Rücken- und Bauchteils. Aus den Fellen werden zunächst entsprechend große Flächen für den Zuschnitt der Pelzbekleidung zusammengenäht. Unter besonderen Bedingungen kann das Bekleidungsstück aus über 1000 Fellstücken gefertigt sein. Von den genannten Besonderheiten abgesehen ist die Technologie zur Herstellung von Pelzbekleidung der Konfektionierung textiler Bekleidung sehr ähnlich (vgl. 19.5.).

20.2. Synthetiks

Die Bezeichnung Synthetiks wird als Oberbegriff für herkömmliches Kunstleder und die im letzten

Jahrzehnt entwickelten synthetischen, bekleidungshygienisch lederähnlichen Erzeugnisse verwendet, die unter Bezeichnungen, wie Syntheseleder, Poromerics u. a., bekannt geworden sind. Synthetiks sind flächenförmige flexible Erzeugnisse auf der Basis von Kunststoffen, die sowohl mit als auch ohne Träger hergestellt sein können.
Hauptrohstoffe für die Synthetiks sind Polyvinylchlorid und Polyurethan. Salpetersäurezelluloseester wird als Beschichtungsmaterial immer weniger eingesetzt.

20.2.1. Struktureller Aufbau

Der Aufbau von Synthetiks mit Schichtträgern ist aus Abb. 20.2.1-1 ersichtlich. Folien haben keinen Schichtträger und Veloursynthetiks anstelle des Finishs eine gerauhte Oberfläche. Synthetiks

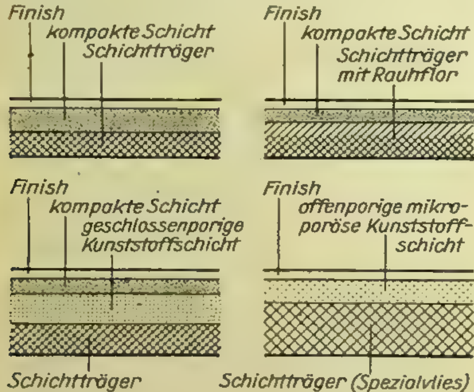


Abb. 20.2.1-1 *Struktureller Aufbau verschiedener Synthetiks*

Tab. 20.2.1-2 *Einteilung der Synthetiks nach lederähnlichen Eigenschaften*

Gruppe Nr.	Bezeichnung	Haupteigenschaften	Einsatzgebiete
I	klassische Synthetiks	flexibel, wasserabweisend	Bucheinband, Tischbelag, Fußbodenbelag
II	geschäumte Synthetiks (Schaumkunstleder)	wie I, weicher, lederähnlicher Griff infolge innerer Hohlräume	Galanteriewaren, Polster, Schuhe, Bekleidung, Fußbodenbelag
III	bekleidungshygienisch lederähnliche Synthetiks	wie II, Wasserdampfdurchlässigkeit wie Leder, teilweise schnittkantenfest	Außen- und Innenschaftwerkstoffe für Schuhe, Bekleidung, Polster

werden in zahlreichen Qualitäten hergestellt, die sich durch ihre Lederähnlichkeit unterscheiden (Tab. 20.2.1-2). Die Lederähnlichkeit wird vorzugsweise durch Porosierung der Kunststoffschicht erreicht. Kunststoffschichten mit vorwiegend geschlossenen (isolierten) Poren sind weitgehend wasserdampfundurchlässig, Kunststoffschichten mit vorwiegend offenen (kommunizierenden) Poren besitzen eine dem Leder gleichwertige Wasserdampfdurchlässigkeit. Neben der Porosierung gewinnen dünne Deckschichten auf gerauhtem Schichtträger zunehmend an Bedeutung. Schnittkantenfeste Spezialvliese entsprechen optisch und verarbeitungstechnisch weitgehend der Retikularschicht des Leders.

20.2.2. Rohstoffe für Synthetiks

Polyvinylchlorid (PVC). Der überwiegende Teil der Synthetiks wird auf der Basis von PVC hergestellt, weil es sich hervorragend zur Weichmachung eignet, gute Chemikalienbeständigkeit besitzt, ohne Anfall von Nebenprodukten verarbeitet und preisgünstig hergestellt werden kann. PVC wird als weißes, rieselfähiges, geruch- und geschmackloses Pulver, das schwerentflammbar und physiologisch unbedenklich ist, verarbeitet. Die Einfriertemperatur liegt bei 75 °C. PVC-E-Typen (Emulsionspolymerisate) eignen sich besonders für die Herstellung flüssiger Beschichtungsmassen (Plastisole), PVC-E- und PVC-S-Typen werden bevorzugt als Mischung für die Heißbeschichtung und das Kalandrieren verwendet.
Weichmacher für PVC sind chemische Verbindungen, die die Einfriertemperatur des PVC herabsetzen und im Kunststoffverband verbleiben, z. B. niedrigmolekulare Ester. Innere Weichmacher werden hauptvalentig, äußere Weichmacher nebenvalentig an PVC gebunden. Die erforderliche Einfriertemperatur von Weich-PVC für Synthetiks, die ≈ −20 °C beträgt, wird nur durch äußere Weichmacher erreicht.
Polyurethan (PUR) hat seit 1965 zunehmend an Bedeutung für die Herstellung hochwertiger Synthetiks gewonnen. Es wird durch Synthese aus *Isozyanat* und *Polyol* hergestellt (vgl. 4.10.2.). Durch gezielte Auswahl der Rohstoffe können Einfriertemperaturen bis −40 °C erreicht werden. Die dem Kunststoff Weichheit und Flexibilität gebenden Molekülteile (Polyole) sind hauptvalentig im Molekül gebunden. PUR-Beschichtungen besitzen dadurch im Vergleich zum PVC gleicher Weichheit und Dicke etwa die doppelte Festigkeit und einen trockeneren, lederähnlicheren Griff. Als Folge der erhöhten Festigkeit können die Beschichtungen dünner gehalten werden. Dadurch wird die Wasserdampfdurchlässigkeit begünstigt und die Flächenmasse der Synthetiks reduziert; außerdem können PUR-Beschichtungen mikroporosiert werden. Diese

Beschichtungen sind in hohem Maße wasserdampfdurchlässig, schützen aber gleichzeitig gegen das Eindringen von Wasser.
Beim Verarbeiten von PUR wird zwischen Ein- und Zweikomponenten-PUR unterschieden. *Einkomponenten-PUR* liegt vor, wenn das fertige ausreagierte PUR aufgrund seiner thermoplastischen Eigenschaften bzw. seiner Löslichkeit verarbeitet wird. *Zweikomponenten-PUR* gelangt als Mischung aus Polyol (Komponente A) und Isozyanat (Komponente B bzw. Härter) zur Verarbeitung. Das PUR entsteht erst im Laufe des Verarbeitungsprozesses.
Hilfsstoffe. *Pigmente* werden zur Färbung des Kunststoffs und für die Oberflächenzurichtung eingesetzt. Wichtige anorganische Pigmente sind Titandioxid und Lithopone für Weiß und Eisenoxide bzw. -hydroxide für Gelbbraun, Rot, Schwarzbraun und Schwarz. Organische Pigmente werden bevorzugt für grüne und blaue, aber auch für rote, gelbe und schwarze Farbtöne eingesetzt. Sie führen bei guter Ergiebigkeit zu hoher Brillanz und klarem Farbton.
Porosierungsmittel dienen der Herstellung poröser Kunststoffschichten. Wichtigstes Porosierungsmittel für die Schaumkunstlederherstellung ist Azodikarbonamid, das sich während der Gelierung des PVC unter Abspaltung von vorzugsweise Stickstoff zersetzt.
Kicker (organische Zink- und/oder Kadmiumverbindungen) steuern die Zersetzungstemperatur des Azodikarbonamids, begünstigen die Bildung feiner Gasbläschen und wirken stabilisierend.
Stabilisatoren werden den Kunststoffen zugesetzt, um eine Zerstörung der Makromoleküle durch UV- und Lichtstrahlen, Wärmeeinwirkung, Hydrolyse u. a. zu verhindern oder zu verzögern.
Füllstoffe werden den Kunststoffen zur Verbesserung spezieller Eigenschaften (z. B. Verringerung von Transparenz und Elastizität) und zur ökonomisch günstigen Rezepturgestaltung beigemengt. Wichtigster Füllstoff ist *Kreide*.
Schichtträger für Synthetiks sind flexible flächenförmige Werkstoffe aus Fäden und/oder Fasern, die innen- oder beidseitig mit vorzugsweise thermoplastischen Kunststoffen beschichtet werden. Die Eigenschaften des Schichtträgers beeinflussen in hohem Maße die Eigenschaften der fertigen Synthetiks, insbesondere Festigkeit, Dehnung, Wassersorptionsvermögen und Griffeigenschaften. Der Verwendungszweck der Synthetiks ist deshalb bestimmend für die Auswahl der Schichtträger (Tab. 20.2.2-1).

Tab. 20.2.2-1 *Übersicht über Schichtträger und ihre Einsatzgebiete*

Schichtträger	Einsatzgebiet und spezielle Eigenschaften
Gewebe	für alle Synthetiks, sofern keine hohe Dehnung und Schnittkantenfestigkeit erforderlich sind
Fadenlagennähgewirke (Malimo)	wie Gewebe, infolge geringer Oberflächenglätte nur mittelfeine bis kräftige Prägungen
Gewirke, Gestricke	für Synthetiks mit hohen Dehnungswerten, insbesondere für Bekleidung, Polster und Täschnerwaren
Vliesfadennähgewirke (Maliwatt)	ähnlich dem Fadenlagennähgewirke, jedoch mit geringerer Festigkeit; für Spezialartikel, z. B. für Musikinstrumententeile
Vliesnähgewirke (Malivlies)	gute Oberflächenglätte und lederartiges Dehnungsverhalten bei geringerer Festigkeit. Einsatzgebiete noch wenig erschlossen, z. B. Synthetiks für Polsterzwecke
Spezialvlies für besonders lederähnliche Synthetiks	Schaftaußen- und -innenwerkstoffe; Festigkeit, Dehnung, Dicke, Schnittkantenfestigkeit und optischer Eindruck entsprechen weitgehend dem Leder
Papier	für dünne Synthetiks, die nicht auf Festigkeit und Flexibilität beansprucht werden, z. B. für Bucheinbände

20.2.3. Vorbereitende Arbeiten für die Synthetikherstellung

Auswahl der chemischen Rohstoffe. Die Ausgangskomponenten werden vor ihrer Verarbeitung zu Synthetiks nach bewährten Rezepturen (Tab. 20.2.3-1) zu weitgehend homogenen Massen gemischt.
Flüssige Kunststoffaufbereitungen. Zur Herstellung flüssiger PVC-Beschichtungsmassen (Plastisole) werden Mischer mit langsamlaufenden Mischwerkzeugen bevorzugt. Hilfsmittel müssen häufig vor ihrer Zumischung zum Kunststoff in separaten Arbeitsgängen mit Weichmacher benetzt werden, um ausreichende Homogenität des Mischgutes in vertretbarem Zeitaufwand zu

Tab. 20.2.3-1 *Ausgewählte Rezepturbeispiele (Angabe in Masseteilen)*

Rezepturbestandteil	Schaumkunstleder		PVC-Weich-Folie
	Schaumschicht	Deckschicht	
PVC-E-Pulver	100	100	50
PVC-S-Pulver	–	–	50
Weichmacher	80	65	55
Pigment	10	18	12
Azodikarbonamid	2,5	–	–
Kicker	2,0	–	–
Stabilisator	–	–	0,8
Gleitmittel	–	–	1,0
Füllstoff (Kreide)	5	5	10

erhalten. Teilweise ist eine Wiederholung dieser Arbeitsgänge notwendig. Als Arbeitsmittel werden Mischer, Walzenreibstühle und auch Mühlen angewendet (vgl. 5.1.2., 5.2.3.).

Einkomponenten-PUR wird in Lösungsmittel gelöst und Hilfsmittel erforderlichenfalls zugemischt. Zweikomponenten-PUR ist nach dem Mischen beider Hauptkomponenten nur begrenzte Zeit verarbeitbar. Beträgt diese Zeit nur wenige Minuten oder Sekunden, so werden die Komponenten in einem *Spezialmischkopf* unmittelbar an der Beschichtungsanlage gemischt. Die Hilfsstoffe werden vorzugsweise dem Polyol zugesetzt.

Feste Kunststoffaufbereitungen sind für die Heißbeschichtung und das Kalandrieren erforderlich. Für die Herstellung von PVC-Aufbereitungen ist es üblich, die Rezepturbestandteile in 2 Stufen (Mischen und Plastifizieren) weitgehend zu homogenisieren. Die erste Stufe wird bevorzugt in Heiß-Kühlmischer-Kombinationen durchgeführt. Über die hochtourigen Mischwerkzeuge der Heißmischer wird dem System so viel Energie zugeführt, daß Gelierung eintritt. Die feinteilige, rieselfähige PVC-Aufbereitung der ersten Stufe wird in Extrudern (kontinuierlich) und/oder auf Walzwerken (diskontinuierlich) ausreichend plastifiziert.

PUR liegt normalerweise als thermoplastisches Granulat vor, das, von Lagerung, Trocknung und eventueller Vortemperierung abgesehen, keiner speziellen Aufbereitung bedarf.

Schichtträgervorbereitung. Vor der Beschichtung werden die einzelnen Schichtträgerstücke zu Großdocken zusammengenäht und erforderlichenfalls gefärbt und geglättet.

Die Herstellung hochwertiger Spezialvliese als Schichtträger für besonders lederähnliche Synthetiks ist zu einem Spezialgebiet der Synthetikherstellung geworden. Mischungen aus vorzugsweise Polyester- und Polypropylenfasern hoher Feinheit werden zu einem Rohvlies verarbeitet, das durch Nadeln, Schrumpfen und Imprägnieren verfestigt wird.

Kaltbeschichtung. Flüssige Beschichtungsmassen werden bei Raumtemperatur auf Schichtträger oder Behelfsschichtträger (Mitläufer) aufgetragen. Als *Direktbeschichtung* wird das Verfahren bezeichnet, bei dem die Beschichtungsmasse direkt auf den Schichtträger aufgetragen und die Beschichtung durch mehrere Schichten (Striche) bis zur Deckschicht vervollständigt wird. Die *Indirektbeschichtung* (*Umkehrverfahren*) beginnt mit dem Auftragen der Deckschicht auf einen Behelfsschichtträger. Danach werden die Schichten in umgekehrter Reihenfolge bis zum Schichtträger aufgebracht. Der Behelfsschichtträger wird nach Verfestigung der Beschichtung vom Synthetik getrennt und wiederverwendet. Direkte Beschichtungen erfordern flächenstabile Schichtträger, z. B. Gewebe, Spezialvliese. Durch Indirektbeschichtung können auch stark dehnbare, weniger feste Schichtträger, z. B. Gewirke, verarbeitet werden.

Die flüssigen Beschichtungsmassen werden durch *Beschichtungseinrichtungen*, wie Rakel oder Reverse-Roll-Coater, auf den Schichtträger oder Behelfsschichtträger aufgebracht. Danach erfolgt im Trockenkanal die Verfestigung der Beschichtung bzw. im Gelierkanal bei Temperaturen von 160 bis 170 °C die vollständige Homogenisierung von Weichmachern und PVC. Gelierung tritt erst bei Abkühlung der Beschichtung ein. Die Energiezufuhr erfolgt durch Heißluft, die entweder über Wärmetauscher (indirekte Heizung) oder durch Verbrennung der Energieträger, z. B. Stadtgas, im Gelierkanal (direkte Heizung) gewonnen wird. Stahlbandbeschichtungsanlagen werden aus Gründen der Arbeitsproduktivität und der rationellen Energieanwendung direkt beheizt.

Beschichtungsanlagen bestehen aus Beschichtungseinrichtungen, Trocken- bzw. Gelierkanälen und Hilfseinrichtungen, wie Nähmaschinen, Ab- und Aufrollung, Warenspeicher, Kühlstrekken, Kühlwalzen u. a. Mehrstrichanlagen tragen mehrere Schichten hintereinander ohne Produktionsunterbrechung auf (Abb. 20.2.4-1).

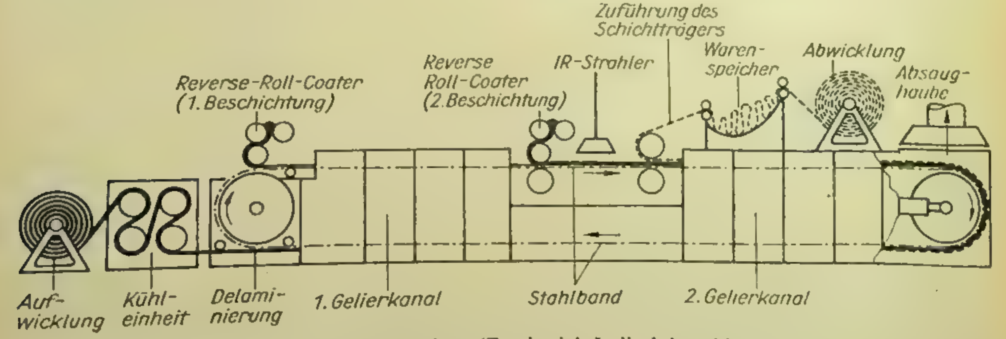


Abb. 20.2.4-1 Stahlbandbeschichtungsanlage (Zweistrich-Indirektbeschichtung)

Heißbeschichtung. Feste thermoplastische Kunststoffaufbereitungen, wie Weich-PVC, PUR u. a., eignen sich zur Heißbeschichtung. Das Verfahrensprinzip besteht darin, daß die Kunststoffaufbereitungen bis zum plastischen Zustand erwärmt, durch einen Spalt gepreßt und im plastischen Zustand mit dem Schichtträger verbunden werden (Abb. 20.2.4-2). Die Porosierung der Beschichtung wird mit dem Verfahren nicht ausreichend beherrscht.

Kalanderverfahren zur Herstellung von PVC-Weichfolie unterscheiden sich von den Heißbeschichtungsverfahren durch Wegfall des Schichtträgers, höhere Arbeitsgeschwindigkeit und die höhere Präzision dünner Kunststoffschichten. Die Walzen moderner Kalanderanlagen (Abb. 20.2.4-3) besitzen Einzelantriebe und auch separate Temperatursteuerungen (Tafel 79).

20.2.5. Oberflächenveredlung

Modische Aktualität und Ideenreichtum sind Hauptmerkmale der Oberflächenveredlung, die durch Farbgebung, Glanzeinstellung und Strukturierung der Oberfläche sowie durch Verbesserung der Echtheits- und Griffeigenschaften zu erhöhtem Gebrauchswert der Synthetiks führen.

Farbige Gestaltung und Lackierung. Die farbige Gestaltung der Oberfläche erfolgt vorzugsweise im Tiefdruckverfahren (vgl. 17.2.4.), aber auch durch Rakel-, Hochdruck- und Spritzverfahren.

Durch die *Lackierung* werden die farbige Oberfläche gegen mechanische Beschädigung geschützt, der Glanz- bzw. Matteffekt gesteuert und die Echtheitseigenschaften der Synthetiks verbessert.

Oberflächenstrukturierung wird vorwiegend als letzter Arbeitsprozeß durchgeführt. Dabei kommt der Imitation von Lederoberflächen besondere Bedeutung zu. Synthetiks werden auch velourartig geschliffen oder zur Bildung ungleichmäßiger lederähnlicher Falten getumbelt. Auch Perforierungen und elektrostatische Beflockungen zählen zur Oberflächenstrukturierung.

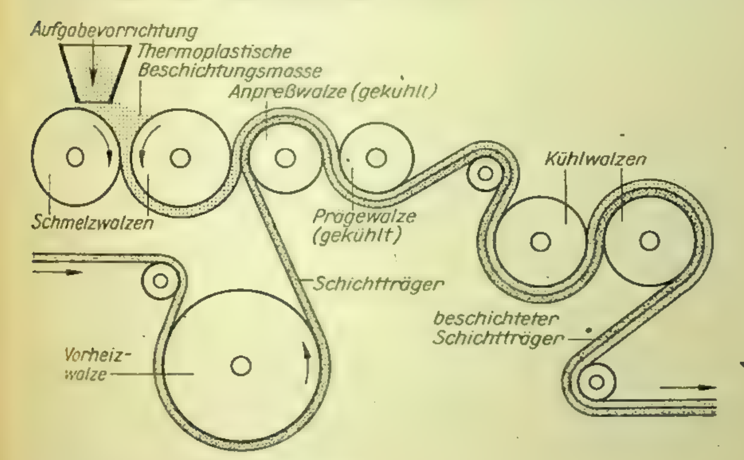


Abb. 20.2.4-2 Walzenschmelzanlage

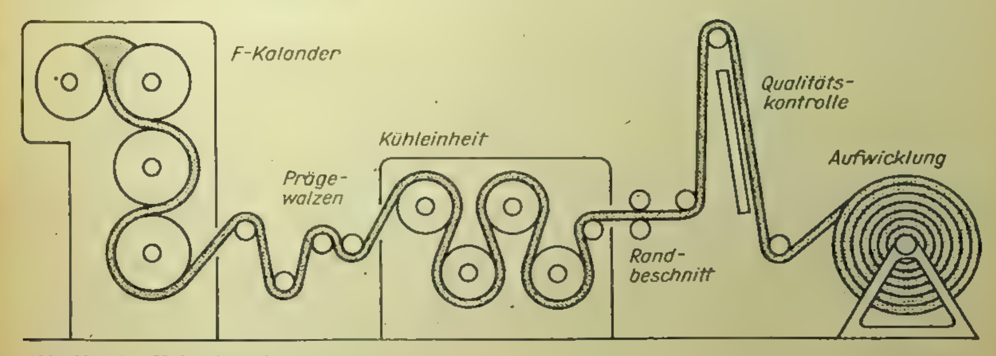


Abb. 20.2.4-3 Kalanderanlage

Die *Prägung* wird vorzugsweise als separater Arbeitsgang auf einer Prägeanlage durchgeführt. Das Narbenbild wird dabei durch gravierte Walzen in die durch IR-Strahlung erwärmte, leicht plastizierte Synthetikoberfläche gedrückt.

20.3. Lederfaser- und Zellulosefaserwerkstoffe

Diese Werkstoffgruppe dient der Substitution wenig beanspruchter standiger Lederteile in Schuhen und Lederwaren, wie Brandsohlen, Hinterkappen, Zwischenteile in Taschen und Mappen. Die Herstellungstechnologie ist der Papierherstellung ähnlich (vgl. 7.4., 7.5.). Vulkanfiber nimmt eine Sonderstellung ein.

20.3.1. Lederfaserwerkstoffe (Lefa)

Rohstoffbasis sind Lederabfälle bevorzugt vegetabilisch-synthetischer Gerbung. Chromlederabfälle eignen sich nur in begrenztem Umfang zur Verarbeitung zu Lefa. Als Verschnittmittel werden Zellulosefasern, in untergeordnetem Umfang auch Haare, Korkabfälle und Sägespäne, verwendet.
Die Rohstoffe werden nach Rezepturen, z. B. 50% vegetabilisch gegerbte Lederabfälle, 35% Chromfalzspäne, 15% Chromspalte, 5% Lefa-Regenerat, gemischt und in trockenem Zustand auf 20-mm-Stücke zerkleinert. Feinzerkleinerung und Faseraufschluß erfolgen in wäßriger Suspension mit Zahnscheibenmühlen, Scheibenmühlen (vgl. Abb. 7.4.1-4) und Holländern. Der Faserbrei (*Pulpe*) wird in Bütten zwischengelagert, dort mit Bindemittel, Fettungsmittel sowie erforderlichenfalls mit synthetischen Gerb- und Farbstoffen behandelt. Als Bindemittel dienen wäßrige Dispersionen synthetischen oder natürlichen Kautschuks.
Die Pulpe mit ≈ 2% Feststoff wird in Siebkästen oder auf Langsiebmaschinen (vgl. 7.6.) durch Abtropfen, Evakuieren und Abquetschen entwässert und der endgültige Feuchtigkeitsgehalt durch Trocknen eingestellt.
Lefa wird in 1,0 bis 1,5 m^2 großen Platten (Siebkasten) oder als endlose Warenbahn (Langsiebmaschine) hergestellt. Die Oberfläche kann geschliffen, mit Deckfarben zugerichtet, gebügelt oder auch geprägt sein.

20.3.2. Zellulosefaserwerkstoffe

Durch Rohstoffmischungen sind alle Übergänge vom Lefa zum Zellulosefaserwerkstoff möglich.
Reine Zellulosefaserwerkstoffe, hergestellt unter Verwendung hoher Anteile α-Zellulose und vernetzender Bindemittel, werden in großem Umfang als Brandsohlenwerkstoff eingesetzt. Pappen und Kartons werden in erheblichen Mengen als Hilfsstoffe für die Herstellung von Schuhen und Lederwaren, z. B. für Versteifungselemente, verwendet.
Vulkanfiber ist ein zähelastischer, sehr widerstandsfähiger Werkstoff, der in seinen Eigenschaften dem Transparentleder ähnlich ist. Er eignet sich besonders zur Kofferherstellung. Durch Pergamentieren und Gautschen mehrerer Zellstoff- bzw. Papierlagen und anschließender Trocknung erhält man diesen hornartigen Werkstoff ohne innere Hohlräume.

20.4. Schuhe

20.4.1. Schuhkonstruktion

Schuhgrößen. Grundlage der Schuhkonstruktion ist die Anatomie und Physiologie des Fußes, insbesondere seiner Länge und seines Ballenumfangs. Schuhlänge und -weite sind die wichtigsten abgeleiteten Größen. International übliche Schuhlängenmaße sind das *Zentimetermaß*, das französische *Stichmaß* (1 Stich = 6,67 mm) und das englisch-amerikanische *Sizemaß* (1 Size = 8,5 mm). Die kleinste Schuhlänge entspricht in allen Maßtabellen dem kleinsten zu beschuhenden Kinderfuß. Die Besonderheit des englisch-amerikanischen Maßsystems besteht in der Festlegung der Schuhlänge 0 bis 4 Zoll und gleichen Schuhlängenbezeichnungen für das Kinderschuh- wie für das Herren- und Damenschuhsortiment (Abb. 20.4.1-1).
Zur Verbesserung des Tragekomforts der Schuhe wird für einen Teil der Schuhmodelle jede Schuhlänge in mehreren Weiten hergestellt. Damenschuhe z. B. in den Weiten 4, 5, 6 bzw. D, E, F; Herrenschuhe z. B. in den Weiten 5, 6, 7 bzw. E, F, G. Die Differenz zweier benachbarter Schuhweiten entspricht einer Ballenumfangsdifferenz von 5 mm. Auch halbe Weiten sind gebräuchlich.
Schuhleisten. Der Leisten ist eine für die Schuhherstellung erforderliche Nachbildung des Fußes aus Buchenholz oder Polyäthylen. In die Leistenform werden neben der Fußform auch modische Aspekte, wie spitzer oder breiter Vorschuh, hoher Absatz usw., eingearbeitet. Die Absatzhöhe (Fersensprengung) beeinflußt in hohem Maße die Schuhkonstruktion.
Schuhteile. Das Schuhoberteil, der *Schaft*, besteht meistens aus Vorderteil (*Blatt*), Hinterteilen (*Quartieren*), Lasche (*Zunge*) und Hinterriemen (Abb. 20.4.1-2). Er kann aber auch aus einer noch größeren Zahl von Teilen oder nur aus einem einzigen Teil gefertigt sein. Er wird häufig zur Erhöhung des Tragekomforts gefüttert und

Zentimetermaß 1 cm = 10 mm	Stichmaß (frz.) 1 Stich = 6,67 mm	Size-Maß engl.-amerikan. 3 Size = 1 Zoll 1 Size = 8,5 mm	
10	15	0	Kinderschuhe
11	16	1	
12	17	2	
13	18	3	
14	19	4	
15	20	5	
16	21	6	
17	22	7	
18	23	8	
19	24	9	
20	25	10	
21	26	11	
22	27	12	
23	28	13	
24	29	1	Damen- und Herrenschuhe
25	30	2	
26	31	3	
27	32	4	
28	33	5	
29	34	6	
30	35	7	
31	36	8	
32	37	9	
33	38	10	
	39	11	
	40	12	
	41	13	
	42	14	
	43		
	44		
	45		
	46		
	47		
	48		
	49		
	50		

Abb. 20.4.1-1 Schuhlängenmaße

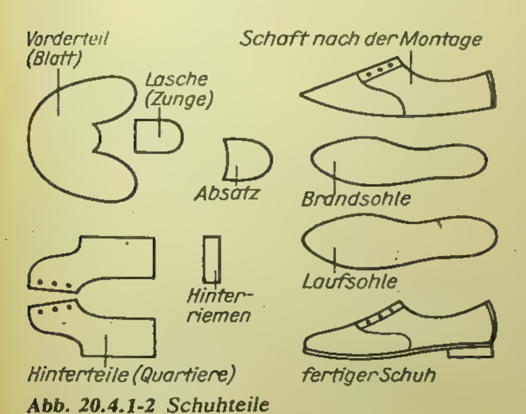


Abb. 20.4.1-2 Schuhteile

zur Verbesserung des Formhaltevermögens an Spitze und Ferse durch *Kappen* versteift. Zum Schuhboden gehören *Brandsohle, Gelenk, Laufsohle* und *Absatz*. Die Schuhteile müssen so konstruiert werden, daß mit Hilfe des Leistens die gewünschte Schuhform, -länge und -weite entstehen.

Schuhwerkstoffe. Bereits während der Modellgestaltung werden die Werkstoffe für die einzelnen Schuhteile festgelegt. Als Schaftaußenwerkstoff werden bevorzugt Leder, daneben hochwertige Synthetiks auf PUR- bzw. PVC-Basis, aber auch textile Werkstoffe eingesetzt. Als Schaftinnenwerkstoff für das Schuhvorderteil dienen bevorzugt Textilien, für die Schuhhinterteile dünne Leder oder Synthetiks mit glatter Oberfläche, für den Fersenteil gleichartige Werkstoffe mit gerauhter Oberfläche.
Die Laufsohlen werden vorzugsweise aus Kunststoff (Gummi, PUR, PVC) gefertigt, weil sie im Vergleich zu Leder absolut wasserdicht sind und erhöhte Verschleißfestigkeit besitzen. Kunststoffsohlen können außerdem ohne Erhöhung der Masse zur mehrfachen Dicke geschäumt werden und sind dadurch zu einem Modefaktor geworden. Als Brandsohlenwerkstoff ist Leder wegen seines hohen Wassersorptionsvermögens besonders geeignet. Häufig werden jedoch Brandsohlen aus Leder- oder Zellulosefaserwerkstoff eingearbeitet. Zur Verbesserung des optischen Eindrucks wird die Brandsohle meist mit einer dünnen Deckbrandsohle überklebt. Hohe Absätze bestehen aus Holz oder Plast mit inneren Hohlräumen, um die Masse des Schuhs so gering wie möglich zu halten.

20.4.2. Schuhteilefertigung

Als Naturprodukte sind weder ganze Leder noch Teile daraus in ihren Eigenschaften völlig gleich. Vor der Schuhteilefertigung muß deshalb jedes Leder einzeln auf seine Verwendungsmöglichkeiten geprüft und danach auch einzeln aufgearbeitet werden. Die in ihren äußeren Abmessungen und inneren Eigenschaften wesentlich gleichmäßigeren Synthetiks und Textilien gestatten dagegen das Ausschneiden der Schuhteile aus mehrfach übereinanderliegenden Warenbahnen.

Schaftteilefertigung. Für die Fertigung der Schaftaußenteile ist zu beachten, daß das *Blatt* den höchsten Anforderungen hinsichtlich Festigkeit, Dehnung, Dauerbiegeverhalten und optischer Wirkung genügen muß. Für diesen Schuhteil werden die besten Lederteile verwendet. Alle Schaftteile werden so aus den Werkstoffen geschnitten, daß sie in Schuhlängsrichtung (Spitze–Ferse) die höchste Festigkeit bzw. die geringste Dehnung zeigen. Die Anforderungen an

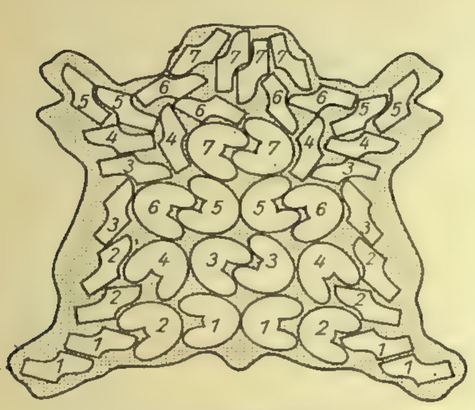


Abb. 20.4.2-1 Ausschneidebeispiel für Schaftteile aus einem Kalbleder

das Leder für den Außenschaft werden vom Blatt über die Hinterteile zur Fersenpartie geringer. Die Verwendung eines Kalbleders für die einzelnen Schuhteile zeigt Abb. 20.4.2-1. Die paarige Numerierung soll auf die Zusammenstellung gleichwertiger Teile zu einem Schaft bzw. zu einem Paar hinweisen. Die Qualitätsforderungen an die Schaftinnenteile steigen – entgegengesetzt zum Außenschaft – vom Vorderteil zur Fersenpartie. Durch den Fersenschlupf wird der Innenschaft besonders stark beansprucht. Aufgrund der optischen Wirkung kommt auch den Innenschafthinterteilen erhöhte Bedeutung zu.
Die Anzahl der Schäfte, die aus gegebener Lederfläche hergestellt werden können, ist vom Schuhmodell und von der Lederqualität abhängig. Im Durchschnitt werden aus 1 m^2 Leder 6 bis 8 Paar Schäfte für Damenschuhe (Pumps) oder 5 bis 7 Paar Schäfte für geschlossene Herrenschuhe gefertigt.
Bodenteilefertigung. Für die Schuhbodenteile aus Leder gelten ähnliche Ausschneideregeln wie für Schaftteile. Laufsohlen werden paarig aus gleichen Lederteilen ausgeschnitten, damit beide

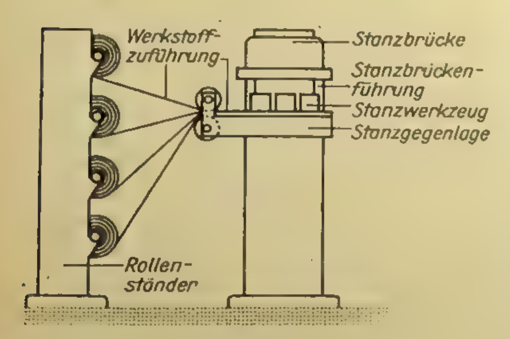


Abb. 20.4.2-2 Brückenstanze

Sohlen weitgehend gleiche Biegesteifigkeit besitzen und sich gleichmäßig abnutzen.
Schuhböden werden in steigendem Umfang als Formsohlen hergestellt. Dazu werden Gummi, PUR oder PVC in Spezialformen zu Laufsohlen in den endgültigen Abmessungen mit Profil und Zierelementen geformt.
Schuhbodeneinheiten, aus Sohle und Absatz bestehend, werden in gleicher Weise hergestellt.
Absätze werden aus mehreren Schichten des Sohlenmaterials aufgebaut oder wie Formsohlen aus Kunststoff vorgefertigt. Hohe Absätze für elegante Damenschuhe werden mit dem Schaftaußenwerkstoff überzogen oder modisch eingefärbt.
In alle Absatzschuhe werden zur Stabilisierung der Schuhform zwischen Brand- und Laufsohle Gelenkstücke (Holz, Stahlfeder) eingearbeitet. Die *Gelenkstücke* überspannen die Brücke zwischen Absatz und Ballenbiegung der Laufsohle. Ihre Form und Größe richtet sich nach der Höhe der Fersensprengung und der Absatzform.
Arbeitsmittel. Zum Ausstanzen der Schuhteile aus einlagigem Werkstoff werden für weiche Leder *Schwenkarmstangen* (Tafel 79), für harte Leder *Tellerstanzen* verwendet. Das arbeitsproduktivere Stanzen mehrlagiger Werkstoffe (Textilien, Synthetiks) erfolgt mit *Karrenbalken-* oder *Brückenstanzen* (Abb. 20.4.2-2).

20.4.3. Schaftmontage

Die Schaftmontage umfaßt alle erforderlichen Arbeitsgänge, um aus den Schafteinzelteilen den Schaft so weit zu fertigen, daß er anschließend gezwickt (geformt) werden kann. Sie wird in allen Betrieben der Schuhherstellung an Montagebändern (bis ≈ 60 Arbeitsplätze) durchgeführt. Dominierend sind die Näharbeiten.
Vorrichten. Zur Vorbereitung der Schaftteile für die Montage gehören insbesondere das Kennzeichnen der Einzelteile mit Artikelnummer, Schaftteilnummer, Schuhlänge und -weite sowie das *Schärfen*, ein Verdünnen der Randteile, um beim Übereinandernähen der Schaftteile Verdickungen weitgehend zu vermeiden oder um das *Buggen* (Umbiegen der Kanten) vorzubereiten. Das Buggen dient der Verbesserung der Schuhästhetik durch Vermeidung offener, meist graugrüner Lederquerschnitte. Um ein Reißen des Leders an stark beanspruchten Schaftbereichen, wie Schaftkanten, Fersennähten oder Ecken im Schuhvorderteil, zu verhindern, werden diese Bereiche durch textile Bänder hoher Festigkeit verstärkt. Nichtgebuggte Schaftkanten werden häufig gefärbt, der Außenschaft mit Prägungen, Verzierungen oder modischem Farbeffekt versehen. Für Sommerschuhwerk wird häufig das Schuhvorderteil perforiert.
Kleben. Einige Schaftteile werden vor dem Nähen zu einem Werkstoffverbund verklebt.

Das trifft auf die Positionierung von Innen- und Außenschaftteilen sowie auf eventuell einzuarbeitendes Zwischenfutter zu. Dem Buggen geht ebenfalls eine Klebstoffbehandlung, das *Zementieren*, der geschärften Kanten voraus. Als Klebstoff werden vorzugsweise Dispersionen oder Lösungen auf der Basis von Natur- bzw. Synthesekautschuk verwendet. Auf größere zu verklebende Schaftflächen wird der Klebstoff hauchdünn als zusammenhängender Film oder rasterförmig aufgetragen, um die Wasserdampf- und Luftdurchlässigkeit des Schaftes nicht wesentlich zu beeinträchtigen. Hoher Fettgehalt der Leder erschwert den Klebeprozeß.

Nähen. *Nähte* (Haltenähte) sind die wichtigsten Verbindungselemente der Schaftteile. Haltenähte dienen gleichzeitig, Ziernähte ausschließlich der modischen Schuhgestaltung (Abb. 20.4.3-1). Je nach Modellgestaltung werden in der Schaftmontage bis ≈ 4 m Naht pro Schuhpaar benötigt. Die Nähtechnik von Leder ist der von Textilien ähnlich (vgl. 19.5.2.). Für

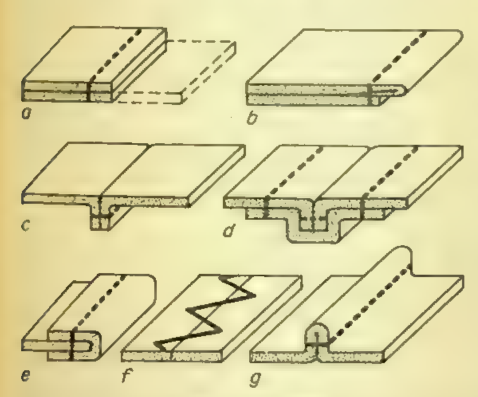


Abb. 20.4.3-1 Wichtige Schuhnähte: a Abschlußnaht mit offener Kante und b mit Buggkante, c Sturznaht (Bestechnaht), d Sturznaht mit Einfaß (Spannaht), e Einfaßnaht, f Zickzacknaht, g Biesennaht

Leder sind mittelschwere und schwere Nähmaschinen erforderlich (Tafel 79). Die Automatisierung der kurzen, meist gekrümmten Nähte mit präzisem Abstand von der Schaftteilkante und dem gegen Ende der Montage vorliegende dreidimensionalen Schaft befindet sich noch in der Anfangsphase.

Fügen und Umformen durch Hochfrequenzerwärmung. Der steigende Einsatz synthetischer Schaftwerkstoffe hat die Anwendung der HF-Technik begünstigt. Thermoplaste mit polarer molekularer Struktur können im hochfrequenten dielektrischen Feld in wenigen Sekunden bis zur Schmelze erwärmt und in diesem Zustand geschweißt oder verformt werden. Durch Schweißen können Näharbeiten ersetzt werden.

Schaftteile auf PVC-Basis sind für die HF-Technik besonders, solche auf PUR-Basis nur teilweise geeignet. Leder kann aufgrund fehlender thermoplastischer Eigenschaften nur durch Anwendung von Schweißhilfsmitteln geschweißt werden. Besondere Bedeutung hat die HF-Technik für das *Prägen* von Schuhvorderteilen, insbesondere für die Imitation von Ziernähten, sowie für das Befestigen von Applikationen erreicht. Beim *HF-Schweißstanzen* wird während des Stanzens der Thermoplast über die Werkstoffkante gezogen, so daß in wenigen Sekunden ein dem Buggen ähnlicher Effekt erzielt wird.

20.4.4. Zwicken

Als *Zwicken* wird die Formgebung des Schuhschafts und seine feste Verbindung mit der Brandsohle bezeichnet. Das Zwicken eines Schuhs erfolgt vorzugsweise in 3 Teilabschnitten, dem Spitzen-, Fersen- und Seitenzwicken. Für jeden Abschnitt sind spezielle *Zwickmaschinen* erforderlich. Neueste Entwicklungen sehen nur noch 2 Arbeitsprozesse, das Zwicken des Vor- und Rückfußes, vor. Das Zwicken des mittleren Schuhteils wird anteilmäßig auf diese beiden Prozesse aufgeteilt.

Die wichtigsten Schaftversteifungselemente, die Hinter- und Vorderkappen, werden zwischen Außen- und Innenschaft eingeklebt und danach der Fersenbereich über einen Spezialleisten zu einem faltenlosen Werkstoffverbund vorgeformt (*Rückfußvorformen*). Dann wird der Leisten mit angehefteter Brandsohle und übergestecktem vorgeformten Schaft in einer Zwickmaschine positioniert. Der Leisten wird so in den Schaft hineingedrückt, daß der Schaft in allen seinen Teilen fest am Leisten anliegt. Bei diesem Arbeitsgang nimmt der Schaft die Form des Leistens an. Die Dehnbarkeit der Schaftwerkstoffe ist eine Voraussetzung für das Zwicken. An der Schuhspitze wird in Abhängigkeit von der Leistenform mit einer Dehnung der Schaftwerkstoffe bis zu 25% gerechnet.

Der Zwickeinschlag (≈ 15 mm) wird anschließend auf der gleichen Maschine durch Scheren um die Brandsohle gelegt und daran befestigt. Je nach Befestigungsart wird zwischen *Täks-* und *Klebezwicken* unterschieden. Zuführen und Einschlagen der Täks bzw. Einstreichen des Brandsohlenrands mit Klebstoff erfolgen unmittelbar nach bzw. vor dem Einscheren des Zwickeinschlags. Das Täkszwicken ist vom Klebezwicken bereits weitgehend verdrängt worden. Das Fehlen von Nägeln ermöglicht, leichtere und flexiblere Schuhe herzustellen und begünstigt die Anwendung arbeitsproduktiver Schuhbodenbefestigungsverfahren.

20.4.5. Schuhbodenmontage

Der gezwickte eingeleistete Schuh wird im letzten Hauptabschnitt der Schuhfertigung mit Laufsohle und Absatz ausgerüstet. Diese beiden Schuhbodenteile bilden in zunehmendem Maße eine Montageeinheit. Damenschuhe mit hoher Fersensprengung erfordern auch weiterhin eine separate Absatzmontage. In vorbereitenden Arbeiten wird der Zwickeinschlag glattgeschliffen und aufgerauht. Der Raum innerhalb des Zwickeinschlags wird mit Ausballmasse o. a. Werkstoff ausgefüllt, sofern er nicht durch Kunststoff beim Anspritzen oder Anvulkanisieren ausgefüllt wird.

Nähen und Nageln sind die klassischen Schuhbodenbefestigungsverfahren. Sie dienen zur Herstellung flexibler, rahmen-, zwie- und durchgenähter bzw. genagelter Schuhe. Sie sind infolge hohen Arbeitsaufwands und der gegenwärtig bevorzugten synthetischen Bodenwerkstoffe, die sich nur teilweise für diese Befestigungsverfahren eignen, stark zurückgegangen. Flexible Schuhe, geeignet als Kinder-, Sport-, Lauf- und Hausschuhe, werden oft ohne Brandsohle gearbeitet. Die Verbindung von Schaft und Sohle erfolgt außerhalb des Leistenbereichs durch Zwickausschlag. Die befestigten Sohlen werden durch Fräsen in die endgültige Form gebracht, der Sohlenrand erforderlichenfalls gefärbt und geglättet.

Kleben. Es können fast alle Schuhbodenwerkstoffe geklebt werden. Für Kunststoffsohlen sind Klebeverfahren besonders geeignet. Bevorzugt werden Klebstoffe auf Kautschuk- und PUR-Basis sowie Schmelzklebstoffe verwendet. Das Lösungsmittel flüssiger Klebstoffe wird vor dem Klebeprozeß abgelüftet, Schmelzkleber vorher verflüssigt. Sohlen aus flächigem Werkstoff, z. B. Porokreppplatten, müssen wegen des etwas reichlichen Zuschnitts abschließend gefräst werden. Die bereits in allen Einzelheiten exakt bemessenen Formsohlen bzw. Bodeneinheiten (Sohle und Absatz) brauchen dagegen nur aufgeklebt zu werden. Sorgfältiges Rauhen von Zwickeinschlag und Laufsohle sind Voraussetzung für eine gute Haftung (Tafel 79).

Spritzgußverfahren. Das Anspritzen von Sohle und Absatz vereinigt in einem Arbeitsgang die Formung der Sohleneinheit aus dem Kunststoffgranulat und deren Befestigung am gezwickten Schaft. Der über seine Schmelztemperatur erhitzte Thermoplast wird in eine Sohlenform gespritzt, die von der Brandsohle des gezwickten Schafts geschlossen wird. Der Thermoplast verbindet sich während des Spritzgusses mit den Fasern des aufgerauhten Zwickeinschlags und der aufgerauhten Brandsohle. Das Spritzgußverfahren zeichnet sich durch sehr geringe Werkstoffverluste und den Wegfall des Zuschneidens und der Sohlenrandbearbeitung bzw. des Vorformens der Schuhbodenteile aus. PVC ist für das Spritzgießen der Sohleneinheit besonders geeignet, aber auch PUR und Kautschuk werden dafür verwendet. Der Spritzguß einer Sohleneinheit erfordert nur wenige Sekunden Arbeitszeit.

Anvulkanisieren. Unvulkanisierte Gummimischungen in Form von Granulat, Riegeln oder ausgestanzten Sohlen werden in einer Sohlenform, die vom gezwickten Schaft geschlossen wird, gleichzeitig zur Sohleneinheit geformt, vulkanisiert (vgl. 5.2.5.) und fest mit dem Schaft verbunden. Auf diese Weise wird vorwiegend Strapazierschuhwerk hergestellt. Wegen der hohen Vulkanisationstemperatur ist dieses Verfahren für Schuhteile aus vegetabilisch gegerbtem Leder nicht geeignet.

20.5. Lederwaren

20.5.1. Täschnerwaren

Täschnerwaren sind Behältnisse für die Reise und den täglichen Bedarf, wie Koffer, Stadt-, Schul- und Aktentaschen, Schreibmappen, Brieftaschen, Geldbörsen usw. Sie werden vorzugsweise aus Synthetiks, aber auch aus Leder, Textilien, Lederfaser- oder Zellulosefaserwerkstoff hergestellt. Die wichtigsten Teile des Taschengrundkörpers sind Vorder- und Rückteil, Boden- und Seitenteile sowie Trag- und Verschlußelemente. Aus Gründen des Formhaltevermögens oder eines vollen, weichen Griffs werden Taschenteile häufig mit Pappe versteift oder mit weichen Werkstoffen, z. B. PUR-Schaum, hinterlegt. Trenn- und Fügetechnik zur Herstellung von Täschnerwaren entsprechen im wesentlichen den Abschnitten 20.4.2. und 20.4.3.

20.5.2. Lederbekleidung

Beim Herstellen von Mänteln, Jacken, Hosen, Kostümen, Kopfbedeckungen usw. müssen die strukturellen Unterschiede innerhalb eines Leders und zwischen verschiedenen Ledern berücksichtigt werden. Von den besonders geeigneten leichten Ziegen- und Kalbsledern sind mehrere Leder zur Anfertigung eines größeren Kleidungsstückes nötig und entsprechende Nähte unvermeidlich. In zunehmendem Maße werden an Stelle von Leder hochwertige PUR-beschichtete Synthetiks zu leichter, wetterfester, lederähnlicher Bekleidung verarbeitet. Das gleiche trifft auch auf Rauhlederimitationen zu. Die Näharbeiten stimmen weitgehend mit denen der Textilindustrie überein (vgl. 19.5.2.).

Fingerhandschuhe werden aus dünnen, weichen und zügigen Ledern hergestellt. *Ausrecken* des Leders in Längsrichtung bis fast zur Dehnungsgrenze und ein entsprechender Zuschnitt der Einzelteile sichern, daß die Handschuhe in der Weite dehnbar bleiben, so daß Finger und Handfläche eng und faltenlos umschlossen werden können. Handschuhleder können durch Synthetiks nur schwer ersetzt werden.

20.5.3. Polster- und Sattlererzeugnisse

Polster- und Sattlererzeugnisse aus Leder für Sitzmöbel und für die Landwirtschaft sind auf einen kleinen Anteil zurückgegangen. Der Verbrauch von Polstersynthetiks für die Ausstattung der Verkehrsmittel und für Sitzmöbel ist steil angestiegen. An der Verbesserung der noch nicht befriedigenden hygienischen Eigenschaften der Polstersynthetiks wird weltweit intensiv gearbeitet. Auf dem Gebiet der Sportartikel, wie Ballhüllen, Gerätebezüge, Reitsättel usw., kann Leder kaum durch Synthetiks ersetzt werden.

20.5.4. Technische Ledererzeugnisse

Sortiment und Menge technischer Ledererzeugnisse sind rückläufig, ohne daß ein allgemeiner Verzicht auf derartige Ledererzeugnisse vorläufig möglich ist. So werden Leder zum Betreiben von Textilmaschinen (*Laufleder*, *Nitschelhosen*, *Picker*, *Kratzenleder* u. a.), *Dichtungs-* und *Manschettenleder* für Rohrleitungen, Ventile und Pumpen, Leder für Kraftübertragungen, wie *Treibriemen*, *Kupplungsbeläge* und *Schnurleder* sowie *Putz-*, *Polier-* und *Schleifleder* und weitere technische Ledererzeugnisse benötigt.

20.6. Leder- und Rauchwarenpflege

20.6.1. Lederpflege

Für glatte und genarbte Leder wird eine regelmäßige Pflege durch Säubern und Fetten mit handelsüblichen Lederpflegemitteln (Schuhcreme) empfohlen. Die Lederfasern sind nur im gefetteten Zustand genügend geschmeidig.

Pflegeleicht ausgerüstete Leder besitzen einen Schutz gegen das Verspröden der Oberfläche. Trotzdem trägt eine Behandlung mit Lederpflegemitteln in größeren Zeitabständen zur Werterhaltung dieser Erzeugnisse bei.
Rauhleder (Velour, Nubuk) werden gesäubert und glänzende Stellen mit Drahtbürste o. ä. gerauht. Durch Behandeln mit Rauhlederspray wird das Lederfasergefüge geschmeidiger und die wasserabweisende Wirkung verbessert.
Für teilweise stark verschmutzte Lederbekleidung (Kragen, Taschen, Kanten) wird eine Ganzreinigung in Spezialbetrieben empfohlen. Dort werden die nach Farben sortierten Lederbekleidungsstücke mit organischen Lösungsmitteln (Fluorkohlenwasserstoffe) behandelt. Dabei verliert das Leder einen erheblichen Teil seines Fettgehalts, und der Farbton wird aufgehellt. Die gereinigten Leder müssen deshalb rückgefettet, nachgefärbt und schließlich formfixiert werden.

20.6.2. Rauchwarenpflege

Das Entstauben von Pelzbekleidung kann in einfacher Weise durch Klopfen, Schütteln, Bürsten, Saugen oder Druckluftbehandlung erfolgen. Dabei werden Schmutz, Staub und tierische Schädlinge entfernt und das Bekleidungsstück etwas aufgelockert.
Hauptverfahren zur Pflege der Rauchwaren ist das *Läutern*. Das Pelzbekleidungsstück wird in *Läutertrommeln* mit saug- und polierfähigen, feinkörnigen Substanzen, z. B. feine Buchenholzspäne, behandelt. Teilweise erfolgt ein geringer Zusatz organischer Lösungsmittel oder Spezialhilfsmittel. Nach dem Läutern wird das Pelzbekleidungsstück sauber ausgeschüttelt oder ausgeblasen. Das Läutern führt nicht immer zu einer befriedigenden Reinigung des textilen Futters.
Pelzbekleidungsstücke mit stärkeren Verschmutzungen (Kragen, Taschen) oder mit örtlich begrenzten Flecken oder Verfärbungen können — wenn auch nicht in jedem Fall — auf chemischem Wege durch Behandlung mit organischen Lösungsmitteln gereinigt werden.

21. Anhang

21.1. Physikalisch-technische Maßeinheiten

Messen ist das quantitative Bestimmen von Größen, wie Länge, Geschwindigkeit, Temperatur, Stromstärke u. a. Dabei erfolgt ein Vergleich mit einer gleichartigen Größe, die als *Maßeinheit* (kurz: *Einheit*) vereinbart ist. Beim Messen erhält man eine Maßzahl, den Zahlenwert der Größe. Das Meßergebnis wird dann z. B. durch „Die Entfernung beträgt 1048 Meter" oder kurz „l = 1048 m" angegeben. Dabei ist 1048 der Zahlenwert der Größe, „Meter" ist die Einheit und beides zusammen bildet den *Wert der Größe*. Bei der Festlegung eines Einheitensystems geht man von einer geringen Anzahl *Basiseinheiten* aus, durch deren Kombination man dann für alle anderen, nicht durch die Basiseinheiten direkt erfaßten Größen *abgeleitete Einheiten* erhält. Das *Internationale Einheitensystem* (*SI*) beruht auf 7 Basiseinheiten und 2 ergänzenden Einheiten (Tab. 21.1.0-1).

Aus den Basiseinheiten (und den ergänzenden Einheiten) abgeleitete Einheiten sind z. B. Meter je Sekunde (m/s) für die Geschwindigkeit, Kilogramm je Kubikmeter (kg/m^3) für Dichte, Amperesekunde (A · s) für die Elektrizitätsmenge und viele andere mehr. Man nennt diese Einheiten auch *kohärente Einheiten*, da sie mit den Basiseinheiten durch den Zahlenfaktor 1 verknüpft sind. Sie haben oft zusätzlich noch eigene

Tab. 21.1.0-1 *Basiseinheiten und ergänzende Einheiten des SI*

Größenart	Basiseinheit bzw. ergänzende Einheit	Kurzzeichen	Definition
Länge	Meter	m	1 m ist gleich 1650763,73 Wellenlängen der orangefarbenen Spektrallinie des Atoms Krypton 86.
Masse	Kilogramm	kg	1 kg ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps.
Zeit	Sekunde	s	1 s ist die Dauer von 9192631770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands des Atoms Cäsium 133 entspricht.
elektrische Stromstärke	Ampere	A	1 A ist die elektrische Stromstärke in 2 parallelen Leitern mit einem Abstand von 1 m, zwischen denen im Vakuum je Meter Länge eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N auftritt.
Temperatur (thermodynamische)	Kelvin	K	1 K ist der 273,15te Teil der (thermodynamischen) Temperatur des Tripelpunktes von Wasser (für praktische Belange verwendet man die Internationale Praktische Temperaturskale).
Stoffmenge	Mol	mol	1 mol ist die Stoffmenge eines Systems, das soviel Elementarteilchen enthält, wie Atome in 0,012 kg des Kohlenstoffs 12 enthalten sind.
Lichtstärke	Candela	cd	1 cd ist die Lichtstärke, die 1/600000 m^2 der Fläche eines schwarzen Körpers bei der Erstarrungstemperatur des Platins bei einem Druck von 101325 Pa senkrecht zu seiner Oberfläche ausstrahlt.
ebener Winkel	Radiant	rad	ergänzende Einheit; 1 rad ist der Winkel zwischen 2 Kreisradien, die aus dem Kreisumfang einen Bogen ausschneiden, dessen Länge gleich dem Radius ist.
Raumwinkel	Steradiant	sr	ergänzende Einheit; 1 sr ist der Raumwinkel, dessen Scheitel im Mittelpunkt einer Kugel liegt, und der aus der Oberfläche dieser Kugel eine Fläche gleich der eines Quadrats ausschneidet, dessen Seite gleich dem Radius der Kugel ist.

Bezeichnungen, z. B. Coulomb für die vorstehend erwähnte Amperesekunde. Um den Umgang mit sehr großen oder sehr kleinen Zahlenwerten bei der Angabe der Werte von Größen zu vermeiden, verwendet man Vorsätze (Tab. 21.1.0-2), durch die nunmehr auch *inkohärente SI-Einheiten* entstehen (Zahlenfaktor $\neq 1$).

Tab. 21.1.0-2 *Vorsätze für Maßeinheiten*

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor, mit dem die Einheit multipliziert wird
Exa	E	10^{18}
Peta	P	10^{15}
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^{9}
Mega	M	10^{6}
Kilo	k	10^{3}
Hekto	h	10^{2}
Deka	da	10
Dezi	d	10^{-1}
Zenti	c	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Mikro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Piko	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}

Diese Vorsätze sind jedoch nicht in allen Fällen zulässig. Auch dürfen niemals 2 Vorsätze miteinander kombiniert werden, man darf also z. B. für nm (Nanometer, 1 nm = 10^{-9} m) nicht mμm schreiben. Sie dürfen auch *nur* in Verbindung mit Einheitenkurzzeichen verwendet werden, also nicht μ, sondern μm (Mikrometer, 10^{-6} m). Die Vorsätze Hekto, Deka, Dezi und Zenti sind nur

noch dort anzuwenden, wo dies bisher schon üblich war.

Neben den kohärenten und inkohärenten SI-Einheiten sind teilweise noch SI-fremde Einheiten (die sämtlich inkohärent sind, da sie über einen Zahlenfaktor $\neq 1$ mit den kohärenten SI-Einheiten verknüpft sind) zugelassen. Die Tab. 21.1.0-3 enthält die wichtigsten von den Basiseinheiten der Tab. 21.1.0-1 abgeleiteten SI-Einheiten sowie zulässige SI-fremde Einheiten. Veränderungen gegenüber wegfallenden, SI-fremden Einheiten zeigt Tab. 21.1.0-4.

Neben den Maßeinheiten sind noch eine Reihe von Kennwörtern, z. B. für Verhältnisgrößen, üblich (wie Prozent, Promille). Hier handelt es sich nicht um Einheiten im definierten Sinn, obwohl diese Angaben ähnlichen Zwecken die-

Tab. 21.1.0–5 *Lautstärkepegel einiger Schallereignisse (Näherungswerte)*

phon	Art des Schallereignisses
0	Hörschwelle
10	leises Flüstern, Blattsäuseln
20	ruhige Wohnung
30	stille Straße, Rauschen von Bäumen
40	Zerreißen von Papier
50	normale Unterhaltung
60	mittlerer Straßenverkehr
70	Stadtverkehr mit Straßenbahn
80	sehr starker Straßenverkehr
90	Maschinenstanze
100	dröhnende Hupe
110	Blechschmiede
120	Flugzeug am Triebwerk
130	Schmerzgrenze

Tab. 21.1.0–3 *Die wichtigsten SI-Einheiten und zulässigen SI-fremden Einheiten*

Größenart	Benennung der Einheit	Kurzzeichen	Beziehung zu den SI-Basiseinheiten	Bemerkungen
Länge	Meter	m	SI-Basiseinheit	siehe Tab. 21.1.0–1
	Astronomische Einheit	AE	1 AE = $1{,}496 \cdot 10^{11}$ m	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze; nur in der Astronomie zulässig
	Lichtjahr	l.y.	1 l.y. = $0{,}94605 \cdot 10^{16}$ m	siehe Astronomische Einheit
	Parsec	pc	1 pc = $3{,}0857 \cdot 10^{16}$ m	siehe Astronomische Einheit
	Seemeile	sm	1 sm = 1852 m	SI-fremde Einheit; nur in der Seefahrt zulässig; keine Vorsätze
Fläche	Quadratmeter	m^2	$1\ m^2 = 1\ m \cdot 1\ m$	
	Hektar	ha	$1\ ha = 10^4\ m^2$	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze; nur für Flur- und Grundstücke zulässig
Volumen	Kubikmeter	m^3	$1\ m^3 = 1\ m \cdot 1\ m \cdot 1\ m$	
	Liter	ℓ	$1\ell = 10^{-3}\ m^3$	SI-fremde Einheit; nur für Angaben mit einer relativen Unsicherheit $>5 \cdot 10^{-5}$
ebener Winkel	Radiant	rad	ergänzende SI-Einheit	siehe Tab. 21.1.0–1
	Gon	gon	1 gon = $\pi/200$ rad	SI-fremde Einheit; nur in der Geodäsie zulässig
	Grad	°	$1° = \pi/180$ rad	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze
	Minute	′	$1' = \pi/10800$ rad	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze
	Sekunde	″	$1'' = \pi/648000$ rad	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze
Raumwinkel	Steradiant	sr	ergänzende SI-Einheit	siehe Tab. 21.1.0–1

Zeit	Sekunde	s	SI-Basiseinheit	siehe Tab. 21.1.0–1
	Minute	min	1 min = 60 s	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze
	Stunde	h	1 h = 3600 s	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze
	Tag	d	1 d = 86400 s	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze
Frequenz	Hertz	Hz	1 Hz = 1/s	bei Umlauffrequenzen (Drehzahlen) vorzugsweise 1/s verwenden
Geschwindigkeit	Meter je Sekunde	m/s	1 m/s = 1 m · s^{-1}	
	Knoten	kn	1 kn = 1 sm/h = 0,514444 m/s	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze; nur in der Seefahrt zulässig
Beschleunigung	Meter je Quadratsekunde	m/s^2	1 m/s^2 = 1 m · s^{-2}	
Masse	Kilogramm	kg	SI-Basiseinheit	siehe Tab. 21.1.0–1
	Tonne	t	1 t = 10^3 kg	SI-fremde Einheit
	Atomare Masseinheit	u	1 u = 1,66057 · 10^{-27} kg	SI-fremde Einheit; nur in der Kernphysik zulässig; 1 u ist der 12te Teil der Masse eines Atoms Kohlenstoff 12
	Karat	k	1 k = 2 · 10^{-4} kg	SI-fremde Einheit; keine Vorsätze; nur für Edelsteine zulässig
Dichte	Kilogramm je Kubikmeter	kg/m^3	1 kg/m^3 = 1 kg · m^{-3}	
Kraft	Newton	N	1 N = 1 m · kg/s^2	
Druck	Pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m^2 = 1 kg/m · s^2	
	Bar	bar	1 bar = 10^5 Pa	SI-fremde Einheit
Arbeit, Energie, Wärmemenge	Joule	J	1 J = 1 N · m = 1 m^2 · kg/s^2	
	Elektronenvolt	eV	1 eV = 1,60219 · 10^{-19} J	SI-fremde Einheit; nur in der Kernphysik zulässig
Leistung	Watt	W	1 W = 1 J/s = 1 m^2 · kg/s^3	
dynamische Viskosität	Pascalsekunde	Pa · s	1 Pa · s = 1 kg/m · s	
kinematische Viskosität	Quadratmeter je Sekunde	m^2/s	1 m^2/s = 1 m^2/s	
elektrische Stromstärke	Ampere	A	SI-Basiseinheit	siehe Tab. 21.1.0–1
Elektrizitätsmenge	Coulomb	C	1 C = 1 A · s	
elektrische Spannung	Volt	V	1 V = 1 W/A = 1 m^2 · $kg/(s^3$ · A)	
elektrische Feldstärke	Volt je Meter	V/m	1 V/m = 1 m · $kg/(s^3$ · A)	
elektrische Kapazität	Farad	F	1 F = 1 C/V = 1 s^4 · $A^2/(m^2$ · kg)	
elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	1 Ω = 1 V/A = 1 m^2 · $kg/(s^3$ · A^2)	
elektrischer Leitwert	Siemens	S	1 S = 1/Ω = 1 s^3 · $A^2/(m^2$ · kg)	
magnetischer Fluß	Weber	Wb	1 Wb = 1 V · s = 1 m^2 · $kg/(s^2$ · A)	
magnetische Induktion	Tesla	T	1 T = 1 Wb/m^2 = 1 $kg/(s^2$ · A)	
magnetische Feldstärke	Ampere je Meter	A/m	1 A/m = 1 A · m^{-1}	
Induktivität	Henry	H	1 H = 1 Wb/A = 1 m^2 · $kg/(s^2$ · A^2)	
Temperatur (thermodynamische)	Kelvin	K	SI-Basiseinheit	siehe Tab. 21.1.0–1
Temperaturdifferenz	Kelvin	K	SI-Basiseinheit	Die Differenz zur Temperatur 273,15 K wird auch als Celsius-Temperatur bezeichnet und in °C (Grad Celsius) angegeben. Für °C sind keine Vorsätze zulässig.
Lichtstärke	Candela	cd	SI-Basiseinheit	siehe Tab. 21.1.0–1
Lichtstrom	Lumen	lm	1 lm = 1 cd · sr	
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	1 lx = 1 lm/m^2 = 1 cd · sr/m^2	
Stoffmenge	Mol	mol	SI-Basiseinheit	siehe Tab. 21.1.0–1
Energiedosis	Gray	Gy	1 Gy = 1 J/kg = 1 m^2/s^2	
Aktivität	Becquerel	Bq	1 Bq = 1/s	die Benennung Hz ist hier nicht zulässig

nen. Logarithmierte Verhältnisgrößen werden z. B. in Dezibel (dB) oder Neper (Np) angegeben, dabei ist 1 Np = 8,686 dB. Diese logarithmierten Verhältnisgrößen dienen z. B. zur Angabe von Lautstärkepegeln, wobei man die Hörschwelle bei einer Schallfrequenz von 1 000 Hz Null setzt, den gemessenen Schalldruck zu dem an der Hörschwelle ins Verhältnis setzt und das Ergebnis logarithmiert. Dem erhaltenen Zahlenwert setzt man dann das Kennwort phon hinzu (Tab. 21.1.0-5).

lassen, erreicht die Standardisierung im Sozialismus durch die sozialistische Produktionsweise eine neue Qualität.

Standardisierung in der DDR. In der DDR wird die Standardisierung von dem *Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW)*, das dem Ministerrat der DDR untersteht, auf der Grundlage gesetzlicher Bestimmungen geleitet. Das Ergebnis dieser Tätigkeit sind staatliche Standards (*TGL*).

Tab. 21.1.0-4 *Gegenüberstellung veralteter, SI-fremder Einheiten und gesetzlicher Einheiten*

Größenart	veraltete Bezeichnung	Kurzzeichen	zulässige Bezeichnung	Kurzzeichen	Umrechnung
Länge	Ångström	Å	Nanometer	nm	1 Å = 0,1 nm
	X-Einheit	XE	Pikometer	pm	1 XE = 0,100206 pm
Fläche	Ar	a	Quadratmeter	m^2	1 a = 100 m^2
ebener Winkel	Neugrad	g	Radiant	rad	$1^g = \pi/2 \cdot 10^2$ rad
	Neuminute	c	Radiant	rad	$1^c = \pi/2 \cdot 10^4$ rad
	Neusekunde	cc	Radiant	rad	$1^{cc} = \pi/2 \cdot 10^6$ rad
Kraft	Pond	p	Newton	N	1 p = 0,980665 · 10^{-2} N
	Dyn	dyn	Newton	N	1 dyn = 10^{-5} N
Druck	Kilopond je Quadratzentimeter (technische Atmosphäre)	kp/cm^2 (at)	Megapascal	MPa	1 kp/cm^2 = 0,098 1 MPa
	Meter Wassersäule	mWS	Kilopascal	kPa	1 mWS = 9,80665 Pa
	Physikalische Atmosphäre	atm	Kilopascal	kPa	1 atm = 101,325 kPa
	Torr (Millimeter Quecksilbersäule)	Torr (mmHg)	Kilopascal	kPa	1 Torr = 0,133 224 kPa
Arbeit, Energie	Erg	erg	Mikrojoule	µJ	1 erg = 0,1 µJ
Leistung	Pferdestärke	PS	Kilowatt	kW	1 PS = 0,73549875 kW
dynamische Viskosität	Poise	P	Pascalsekunde	Pa · s	1 P = 0,1 Pa · s
kinematische Viskosität	Stokes	St	Quadratmeter je Sekunde	m^2/s	1 St = 10^{-4} m^2/s
Temperatur	Grad Kelvin	°K	Kelvin	K	1°K = 1 K
Temperaturdifferenz	Grad	grd	Kelvin	K	1 grd = 1 K
Wärmemenge	Kalorie	cal	Joule	J	1 cal = 4,1868 J
Leuchtdichte	Stilb	sb	Candela je Quadratmeter	cd/m^2	1 sb = 10^4 cd/m^2
Energiedosis	Rad	rd	Gray	Gy	1 rd = 10^{-2} Gy
Aktivität	Curie	Ci	Becquerel	Bq	1 Ci = 3,7 · 10^{10} Bq

21.2. Standardisierung

Standardisierung im Sozialismus ist die Gesamtheit der durchgeführten Maßnahmen für das planmäßige Ausarbeiten, Durchsetzen, Kontrollieren und Überarbeiten von Standards mit dem Ziel, den Wirkungsgrad der gesellschaftlichen Arbeit zu erhöhen.

Während in kapitalistischen Staaten Standards meist den Charakter von Empfehlungen haben und sich deshalb nicht umfassend durchsetzen

Internationale Standardisierung. Die Staaten des *RGW* arbeiten auch bei Standardisierungsmaßnahmen immer enger und erfolgreicher zusammen, und zwar in den Fachkommissionen der Industriezweige und seit 1962 in der *Ständigen Kommission für Standardisierung* sowie im *Institut für Standardisierung des RGW*. Ergebnisse dieser Zusammenarbeit waren bis 1974 Empfehlungen zur Standardisierung (*RS–RGW*). Die an der Erarbeitung der Empfehlungen beteiligten Staaten übernahmen diese Empfehlungen dann

bis zum festgelegten Termin in ihre nationalen Standards.
Im Juni 1974 haben 8 RGW-Staaten eine Konvention über die Anwendung von Standards des RGW abgeschlossen. Nach dieser sind RGW-Standards (*ST–RGW*) nach ihrer Bestätigung durch die Ständige Kommission für Standardisierung sowohl in der wissenschaftlich-technischen und ökonomischen Zusammenarbeit der DDR mit den anderen RGW-Ländern direkt als auch in der Volkswirtschaft der DDR verbindlich und unverändert anzuwenden.
Eine über die RGW-Staaten hinausgehende internationale Standardisierung wird durch die *International Organization for Standardization* (*ISO*) mit Sitz in Genf betrieben. Dieser Organisation gehören sozialistische und kapitalistische Staaten an. Ergebnisse dieser Arbeit sind ISO-Empfehlungen.
Standards sind Bestlösungen sich wiederholender Aufgaben. Sie dienen z. B. der Vereinfachung der Fertigung und damit der Senkung der Selbstkosten, der Schaffung von Typenreihen u. a. Unterteilt werden sie in *Beschaffenheits-*, *Verfahrens-* und *Verständigungsstandards*. Staatliche Standards müssen von allen Betrieben und Institutionen eingehalten werden; Abweichungen sind nur in Ausnahmefällen möglich.
DDR-Standards- und *Fachbereichstandards*. Erstere enthalten grundsätzliche Festlegungen, die wegen ihrer Bedeutung, insbesondere für die Durchsetzung der Hauptentwicklungsrichtungen der Volkswirtschaft, vom Präsidenten des ASMW bestätigt werden. Fachbereichstandards werden vom Leiter des zuständigen wirtschaftsleitenden Organs für verbindlich erklärt. Alle Entwürfe für staatliche Standards werden im Mitteilungsblatt des ASMW bekanntgemacht. Einsprüche gegen den Inhalt dieser Veröffentlichungen erfahren die erforderliche Beachtung. Bestätigte DDR- und Fachbereichstandards werden im Gesetzblatt der DDR, Teil ST, verkündet.
Werkstandards sind betriebliche Festlegungen zur Ergänzung staatlicher Standards.

Vorzugszahlen sind nach ISO-Empfehlung R 3 international standardisierte Größenstufungen vorwiegend für Hauptabmessungen und zur Aufstellung von Baureihen. Sie sind dezimalgeometrisch gestuft, d. h., alle Zehnerpotenzen (1–10–100–1 000 usw.) sind Glieder der Reihen, und die gleiche Zahlenordnung wiederholt sich in jedem Zehnerabschnitt. Das nachstehende Beispiel zeigt zwei Zehnerabschnitte einer solchen Reihe:
1 1,25 1,6 2 2,5 3,15 4 5 6,3 8 10
12,5 16 20 25 31,5 40 50 63 80 100
Der *Stufensprung*, der Quotient zweier aufeinanderfolgender Glieder, beträgt in diesem Beispiel 1,25, d. h., jede Größe ist um 25% größer als die vorhergehende (z. T. gerundet).
Güte- und Approbationszeichen. Für industrielle und handwerkliche Erzeugnisse, die gemäß den gesetzlichen Bestimmungen über die staatliche Qualitätskontrolle prüfpflichtig sind, kann das ASMW Gütezeichen erteilen. Dabei wird zwischen klassifizierungspflichtigen und nicht klassifizierungspflichtigen Erzeugnissen unterschieden. Gütezeichen sind: für klassifizierungspflichtige Erzeugnisse das *Gütezeichen Q* und das *Gütezeichen 1*, für nicht klassifizierungspflichtige Erzeugnisse das *Attestierungszeichen*. Für importierte Erzeugnisse, deren Konstruktion oder Verwendung den betreffenden Bedingungen der DDR genügen muß, ist das *Approbationszeichen* vorgesehen. Durch diese Zeichen wird bestätigt, daß die damit gekennzeichneten Erzeugnisse Beschaffenheitsmerkmale entsprechend den technischen Vorschriften oder Standards der DDR aufweisen (Abb. 21.2.0-1).

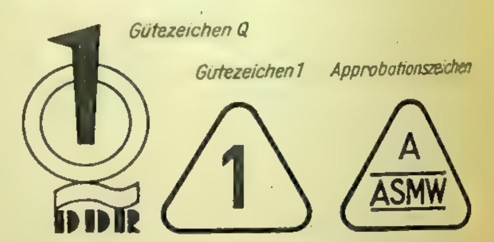


Abb. 21.2.0-1 Güte- und Approbationszeichen der DDR

Register

Im Alphabet steht das Grundwort, auch wenn es durch ein mit Komma angeschlossenes Adjektiv oder eine Gebietsangabe in Klammern erweitert ist, vor Zusammensetzungen mit ihm, also z. B. „Sauerstoff, flüssiger" vor „Sauerstoffaufblaskonverter", „Scheren (Stoff)" vor „Scherenhebetische". Zusammengesetzte Stichwörter sind dort eingeordnet, wo sie am ehesten gesucht werden, z. B. „elektronisches Farbauszugsgerät" unter „Farbauszugsgerät, elektronisches".
Die Umlaute „ä", „ö" und „ü" nehmen keine Sonderstellung ein, sondern sind so behandelt, als ob „a", „o" und „u" stünde. Der Buchstabe „ß" ist wie „ss", Stichwörter mit vorgesetztem griechischem Buchstaben sind entsprechend dessen Aussprache eingeordnet. Stichwörter fremdsprachlicher Herkunft sind meist als eingedeutschte Wörter behandelt, d. h., sie können beispielsweise statt unter „C" unter „K" oder „Z" gefunden werden („Caesium" → „Zäsium"). Die verschiedenen Möglichkeiten der Schreibweise sind also in Zweifelsfällen zu bedenken.
Aufgrund des beschränkten Raumes für das Register wurde häufig nur das Grundwort aufgeführt, wenn die dazugehörigen Unterbegriffe und zusammengesetzten Begriffe sowie die zu einem Verfahren eingesetzten Maschinen o. a. in der Nähe des Grundwortes abgehandelt sind (z. B. Abkantmaschine und -presse bei Abkanten). *Es empfiehlt sich also, stets auch unter dem Grundwort nachzuschlagen, wenn man einen Begriff im Register nicht findet.*
Der Gedankenstrich vor einem Stichwort steht entweder für das ***erste vollständige*** Wort oder für den durch einen senkrechten Strich abgetrennten ***ersten Teil*** des vorhergehenden Stichworts. „f." hinter der Seitenzahl bedeutet Erwähnung des Begriffes auch auf der der angegebenen folgenden Seite, „ff." Behandlung auf mehreren folgenden Seiten.

A

Abakafaser 671
Abbau (Makromoleküle) 188
–arten 23
–, biologischer 201
–system 24
–verfahren 34,49
Abbildungssignal 497
Abbrand 68
Abgas|anlage 62, 548
–turbolader 91
Abgänge 50
Abhitzekessel Tafel 5
Abholzigkeit 240
Abkantmaschine 263
Abkürzkreissäge 245
Ablaufanlage (Eisenb.) 586
Ablaufen (Eisenb.) 585
Ablauf|planung (Bauwesen) 503
–steuerung 480
Ablauge 253
Abraum 26
–förderbrücke 27, 334, Tafel 2
Abrechnungsautomat 414
Abrichtdiamant 282
Absaughaube 58
Abschlußwiderstand 396
Absetzen 265
Absetzer 28,333
Absetzverfahren 552
Absolutverfahren (Steuerung) 500
Absorberstab 68
Absorptionskältemaschine 101
Absperrschieber Tafel 35
Absprengen 234
Abstandhalter 523
Abstandsbremsung 586
Abstechen 277
Abstichgenerator 78
Abstoßen 585
Abtragen, chemisches 283
–, elektrochemisches 283f.
–, thermisches 284
Abwasser|beseitigung 553
–reinigung 555
Abzugsvorrichtung 191
Abzweigstelle 575
Acheson-Verfahren 171
Achse 308,596
Achsschenkellenkung 599
AC-Steuerung 274
Adapter 641
Adcock-Antenne 382, 389
Addiator 413
Addier|gerät 413
–werk 414
Addition (Chemiet.) 160
Additives 181
Adressierungsart (Rechent.) 492
Adsorption 159
Aerosol 291
Aerosol|dose 664
–gerät 434
Aerozyklone 58
Agavefaser 671
Agglomerationsflotation 56
Agglomerieren 58, 125
Ahmings 606
Aiken|-Kode 487
– -Korrektur 487
Airlift 49
Akkumulator 72
– (Rechent.) 489
Aktionsturbine 92
Aktivruder 603
akustisches Oberflächenwellenbauelement 401
Akusto|elektronik 401
–optik 402, 406
Akzeptor 349
Alarm|anlage 391f.
–radar 385
Albumin-Leim 184
ALGOL 495
Alitieren 300
Alkadiene 171
Alkalien 167
Alkali-Erdkali-Silikatglas 237
Alkane 171
Alkene 171
Alkyl|arylsulfonat 180
–benzolsulfonat 180
–chlorsilan 177

Alkylieren 87
Alkyl|sulfat 180
–sulfonate 180
Allrad|antrieb 599
–lenkung 598
Alterung 203
Alterungsschutzmittel 206
Altpapierstoff 254
Aluminium 109, 131
–chlorid 169
–gewinnung 132
Aluminothermisches Schweißen 288
Alumosilikatglas 237
Alweg-Bahn 589
Amalgamverfahren 167
Aminoplaste 175
Ammoniak 163
– -Soda-Prozeß 166
–synthese 163
– -Verbrennungsofen 164
Ammonium|karbamat 164
–sulfat 170
Ammonsalpetersprengstoff 186
Amnioskop 433
Amperestundenzähler 448
Amplitudenmodulation 374
Anaesthesiegerät 434
Analog|ausgabeeinheit 498
– -Digital-Umsetzer 463, 485
–eingabeeinheit 497f.
Anderthalbdeckwagen 581
Anemometer 454
Aneroidbarometer 456
Anflug-Radar-System 386, 387
Anhydrit 216
Anlage, hydrostatische 315
–, pneumostatische 315
Anlassen 296
Anlege|brücke 561
–maschine 678
Anker 604
–ausrüstung 604
–wicklung 356
Anode 396
Anreicherprozess 54
Anschlagmittel 334
Anschluß|station Tafel 58
–stelle 575
Anstrichstoff 183, 298
Antennen 376, 388f.
–charakteristik 388
Anthrachinonfarbstoff 182
Anthrazit 75
Antichlor 168
Antiklinalfalle 41
Antiklopfmittel 86
Antimon 109, 131
Antrieb 323
–, elektrischer 365, 366
–, hydrostatischer 313, 314, Tafel 36
–, pneumatischer 314, 478
Antriebs|einheit 639
–motor 323
–regelung 633
Anvulkanisieren 716
Anzeigebereich 444
Anwenderprogramm 499
Apatit 169
Apertur, numerische 422
Apogäum 635
„Apollo" 640, Tafel 68/69
Appretur 692
Approbationszeichen 722
APT-System 638
AOW 401
Aquaglobus 534, 552
Aquiferspeicher 84
Arcatomschweißen 286
Arbeits|bühne 341
–maschine 98
–speicher, interner 491
Arithmetikeinheit 491
Armaturen 313, 553
Armierung 522, Tafel 55
Armozement 526
Asbest 672
–zement 507
Ascheaustrag 78
Äscher 704
Asphaltmastix 571
Asplund-Defibrator-Verfahren 249
Assemblersprache 494
Astronavigation 637
Astronomische Navigation 610
asynchron 358
Atemschutzgeräte 435
Äthen 172
Äthin 171
Äthylbenzol 172
Atlantik-Super-Trawler 609
Atlasbindung 681
Atom|bombe 68
–kraftwerke 66
–sprengung, unterirdische 46
–uhr 411
Ätzdruck 691
Ätzen 235, 283
Ätzung (Polygrafie) 648
Aufbauten 603
Aufbauverfahren 119
Aufbereitung von Rohstoffen 58
– von Formmassen 189f.
Aufbereitungsmaschine 190
Aufgabeeinrichtung 330
Aufheller, optischer 168
–bad 690
Audiometer 437
Aufladung 91
Auflager 531
Auflösungsvermögen 422
Aufmachung 693
Aufnahmekamera 427
Aufrauhmaschine (Ledert.) Tafel 79
Aufrollung 257
Aufschluß 21f.
–, hydrometallurgischer 125
Aufsenken 279
Aufspulmaschine Tafel 77
Aufstromklassierer 53
Auftragsschweißen 285
Auftriebsverfahren 458
Aufwachsverfahren 126
Aufweiten 265, 267f.
Aufzug 341f., 651
– (Uhr) 407
Aufzugssteuerung 342
Ausbau 535ff.
Ausbauchen 268
Außenrundschleifmaschine 282
Ausgabegerät 493
Ausgießen 290
Ausgleichgetriebe 600
Ausgleichskupplung 308
Aushärten 296
Aushauschere 270
Ausleger 518
–kran 339
Auspuffbremse 598
Ausrüstung (Luftfahrt) 626
Ausschießen 647
Ausschlagmethode 443
Ausschließen 645
Außenstation 640
Außenwandraumerhitzer 542
Ausfahrgruppe 586
Austausch|bau 305
–erdgas 76, 81
Austragsöffnung 208
Austreiber 101
Austriebspreßwerkzeug 208
Auswaschform 648
Auswägemethode 457
Auswurfvorrichtung 587
Auto|bagger 331
–bahn 565f.
–bus 593
–drehkran Tafel 37
Autogenschweißen 287
Autokallimationsfernrohr 453
Autokollimator 424
Automatenstahl 107
Automatikaufzug 408
Automatisierung der Fertigungstechnik 302
Automatisierungstechnik 472ff., Tafeln 52–54
Autopilot 628
Autowarnanlage 392
Axial|kolbenpumpe 316
–lager 307
–lüfter 545
Azetat|faserstoff 673
–seide 178
Azetylzellulose 174
Azofarbstoff 182
Azotierofen 165

B

„Bacat" 608
Back 603
Backen|brecher 51
–bremse 309, 323, 598
–preventer 17
Bagger 26, 331
Bahnanlage 572
– der freien Strecke 575
– des Bahnhofs 575
Bahnbetrieb 572
Bahnendeckung 536
Bahn|hof 575f.
–motor 358
–regelung 637
–steuerung 500
–technik 572
Bake 611
Bakentonne 611
„balanciertes Bohren" 16

Balata-Kautschuk 203
Balgenkamera 425
Balken 519, 523
–brücke 533
–diagramm 503
–gleisbremse 587
–rost 511
Ballempfang 376, 379
Ballon 620
Band 322
–absetzer 333, Tafel 2
–abwurfwagen 325
–bremse 309, 323
Bändchenmikrofon 390
Band|förderer 325, Tafel 1
–gießwalzanlage 151
–kabel 395
–säge 281
–stahl 107
–verschmelzung 647
–wagen 333
–wickelmaschine 677
Barometer 456
Barrierensystem 70
Basis 399
–einheiten 718
BAS-Signal 377
Bastfaserspinnen 678
Bau|ablauf 502
–element, elektronisches 392
–glas 237, 504
–grube 514
–holz 506
–grunderkundung 509
–grunduntersuchung 509
–grundverbesserung 513
–kastenprinzip 303
–keramik 226
Bäumen 682
Baumetall 506
Baumwolle 670
Baumwollspinnverfahren 676
Bau|richtmaß 501
–stahl 107
–standardmaß 501
–stelleneinrichtung 502
–stellenerschließung 502
Baustoffe 503ff.
–, feuerfeste 227
–, keramische 504
Bau|straße 571
–technik 501ff., Tafeln 56–60, 82
–weise, integrierte 68
–weisen 501
Bayer-Verfahren 131
BCD-Kode 487
Bearbeitungs|genauigkeit 272
–zentrum 302, Tafel 31
Beatmungsgerät 435
Becher 663
–werk 326
–werkslader 347
Bedienpult 496
Bedrucken 198
Bedruckstoff 650
Befehl (Datenverarb.) 492
Befehls|ablauf 488
–darstellung 487
–register 489
–satz 492
Befestigungs|mittel 572
–schraube 306
Begasungseinrichtung 669
Behälter 335
– -Dampferzeuger 89
– -Seil-Förderung 48
–wagen 582
Behandlungs|einheit 431
–leuchte 431
–stuhl 431
–technik (Medizint.) 431
Beihalten 265
Beizen 244, 283
–farbstoff 183
Bekleben 541
Bekleidungs|fertigung 693ff.
–konstruktion 694
–technik 670ff.
Bekohlungsanlage 61
Belastungsklassen im Straßenbau 568
Beleber 57
Belebungsverfahren 556
Beleuchtungstechnik 367
Belichtungsmesser 426
Belüftungsturm 552
Benoto-Bohrpfahlgerät 511
Bentonite 223
Benzin 86
Benzol 172
Beregnung 557
Bergbau 11ff., Tafeln 1-4
–, mariner 47
–sicherheit 39
Berge 50
bergmännische Erkundungsarbeiten 20
Bergungsschlepper 610
Berieselung 557
Berme 515
Berstversuch 701
Berührungsschalter 392
Beryllium 109, 134
Besäumkreissäge 245
Beschichten 192, 244, 260, 296, 692
Beschichtungsanlage 710
Beschleuniger (Medizint.) 439
Bespannen 541
Bessemer-Konverter 116
Besteckrechnung 610
Bestrahlungslampe 432
Betatron 468
Beton 505
–bau 521
–bauweise 522
–dachsteindeckung 536
Betonnung 611
Beton|speicher 84
–stein 520
–verflüssiger 505
–zusatzmittel 505
Betriebs|bremsanlage 597
–meßtechnik 442
Bettung 573
Beuchen 690
Beugung 420
Beutel 662, 665
Bewässerungsverfahren 556
Bewegungsschraube 306
Bewehrung 522f., 526
Bewehrungsstab 523
Bewetterung 40
BHT-Koks 77
Biberschwanz 536
Biege|band 243
–maschine 263
Biegen 195, 243, 268
Biege|umformen 268
–versuch Tafel 51
Bild|aufnahmeröhre 377
–fahrplan 584
–röhre 380, 398
–schirmgerät Tafel 50
–telegrafie 374
–verstärkerröhre 398
–wandlerröhre 398
–wechselfrequenz 377
–werfer 428
Billiter-Zelle 167
Bimetall|druckform 649
–meßwerk 447
–thermometer 459
Binär|signal 371
–kode 486
Bindemittel (Baut.) 504f.
– (Silikatt.) 214
Bindungskraft 188
Binnen|hafen 617
–schiff 614
–schiffahrt 612f.
–schiffahrtskanal 617
–verkehr 613
Binnenwasserstraße 615
–, Klasseneinteilung 616
biologische Laugung 57
Biosatellit 637
Bipolar|technik 404
–transistor 399
Birnenaufschluß 25f.
Bit 370, 486
Bitterfelder Zelle 167
Bitumen 85
–beton 570
–emulsion 569
– -Latex-Deckung 537
Bitumina 507
bituminöse Bindemittel 568
bituminöser Baustoff 507
– Schlamm 571
Blähen 210
Blankglühen 295
Blas|folie 191
–stahlverfahren 115
Blatt|feder 597
–meißel 14
Blech|biegemaschine 263
–druck 652
Blei 109, 127
–akkumulator 73
Bleiche 254
Bleichen 690, 707
Bleichmittel 168
Blei|glas 237
–glätte 130
–kammerverfahren 162
–satz 645
Blende 425
Blendrahmentür 542
Blind|leistung 354
–nieten 289
Blinkfeuer 611
Blitzfeuer 611

Blitz|lampe 427
—licht 427
—lichtlampe 368
Block|anlage 577
—bandsägemaschine 245
—guß 120, 143
—heftung 657
—polymerisation 173
—schaltwarte Tafel 53
—stelle 575
—verband 520
—walzwerk 149
—walzwerkstraße 151
Blut|druckmesser 432, 456
—gasanalysator 440
BMSR-Technik 472
Bockgerüst 518
Boden 508f.
—, bindiger 509
—beutel 662
—bewässerung 556
bodenblasender Sauerstoffkonverter 116
Boden|effektfahrzeug 615
—einbau 515
—entwässerung 556
—gewinnung 514
—transport 515
—welle 356
Bogen|bearbeitung 656
—brücke 534
—lampe 367
—offsetdruckmaschine 652
—staumauer 562
Bohlwand 513
Bohrbrunnen 551
Bohren 37, 279
— mit „reiner Bohrlochsohle" 16
Bohr|futter 279, 292
—gerät Tafeln 2, 4
—insel 19
—krone 15
—loch 509
—lochabdichtung 17
—lochkonstruktion 14
—lochsohlenmotor 15
—maschine 279
—öl 291
—plattform Tafel 4
—regime 14
—schiff 19
—spülung 17
—stange 279
—turbine 19
—verfahren 14
—wagen 37, Tafel 4
Bolzen 306
Bombenflugzeug 619
Bombyxseide 672
Bonden 404
Bondieren 692
Bor 134
Boratglas 230
Bordwippkran 605
Borfäden 674
Borosilikatglas 230, 237
Böschung 23, 515
Böschungssystem 24
Boudouardsches Gleichgewicht 113
Bourdonfeder 456
Bourrettespinnerei 678
Boxermotor 92
Boxkamera 425
Brannt|gips 215
—kalk 216
Braunkohle 75ff.
Braunkohlen|generatorgas 76
— -Großkokerei Tafel 5
—hochtemperaturkoks 77
—koks 75
—lagerstätte 25
—tagebau 25, Tafel 2
—verkokungsofen 77
Braunsche Röhre 398
Brecher 58
—anlage 29, Tafel 1
Brechungsgesetz 417
Brechzahl 417
Breitbandkabel 379
Breiten 265
Breitkeilriemengetriebe 310
Brems|anlage 597
—bergförderung 591
Bremse 309, 323, 579
Brems|fallschirm Tafel 66
—gitter 397
—klotz 579
—verband 532, 533
Brennelement 67
Brennen 125, 225
Brenn|kammer 632
—putzen 271
—schluß 631
—schlußgeschwindigkeit 631, 635
—schneiden 270, Tafel 32
—schwindung 225
—stoffe 75f.
Brennstoff|elemente 73
—kassette 67
—umladung 68
—verbrauch 62
—zelle 72, 73
Brennzeit 631
Brettfallhammer 263
Brikettieren 58, 60
Briketts 75
Brikettstrangpresse 60
Brille 421
Brinellverfahren 466
Bromsilberdruck 654
Bronchoskop 433
Broschur 657
BRT 607
Bruchsteinmauerwerk 519
Brücke (Baut.) 533
—, bewegliche 534
— (Schiff) 603
Brücken|kran 338, 605
—stanze 714
Brünieren 299
Brunnen 551
—gründung 512
—stube 551
Brut|faktor 66
—reaktor 67, 69
—stoff 66
Bruttoregistertonnage 607
Buchbindereitechnik 656f.
Buchbindeverfahren 657
Buchblock|bearbeitung 657
—bildung 657
—endfertigung 658
Buchdecken|fertigung 658
—maschine 659
—verzierung 659
Buchdruck 651
Buchendfertigung 659
Buchungsmaschine 414
Buckelschweißen 287
Buganker 604
Bügel 522
—eisen 367
—meßschraube 452
—säge 281
Buggen 714
Bugradfahrwerk 626
Buhne 558
Bündel|ausleger Tafel 73
—bewehrung 526
Buntätze 691
Buntmetall 124
—erzaufbereitung 59
Bürotechnik 411
Butadien 172
— -Acrylnitril-Kautschuk (NBK) 204
Buten 172
Byte 486

C

CAMAC-System 493
Carcinotron 397
Carba-Verfahren 102
Catering Tafel 66
Cermets 229
Chargenprozeß 473
Chargierfahrzeug Tafel 12/13
Chemiefaserstoffe 177, 672
Chemietechnik 159ff., Tafeln 16/17, 84
chemische Verhaltensweise 199
Cheviot 671
Chilesalpeter 170
Chip 404f., Tafel 44
Chlor 167
Chloride 169
Chlorierung 160
Chlorkalk 168
Chloroform 172
Chlor|verbindungen, anorganische 167
—wasserstoff 168
Chrom 109, 132
Chromatograf Tafel 52
Chromgerbung 705
Chromo|ersatzkarton 662
—papier 259
Chronograf 409
Clausius-Rankine-Prozeß 62
Claus-Verfahren 161
COBOL 495
Cockpit Tafel 66
Coder 379
Codierung 370
Cold-Box-Verfahren 145
Computer s. Rechner 483ff.
Computertomografie 439
„Concorde" 618
Consol (Funkfeuer) 382
Container 336

Container|bahnhof Tafel 62
–schiff 608
Containment 70
CO_2-Schutzgasschweißverfahren 286
Crepe 203
CRG-Verfahren 81
Crossbred 671
Croupon 703
CW|-Radar 385
– -Verfahren 384
Cystoskop 433

D

Dach 536
–deckung 536
–entwässerung 537
–konstruktion Tafel 56
–pappe 507
–rinne 537
–ziegel 227
Damm 515
Dämm|deckung 536
–stoff 508
Dampf 87
–druckthermometer 459
Dämpfer 628
Dampf|erzeuger 87ff., 579
–heizung 543
–kraftmaschine 90
–kraftwerk 61, 74
–lokomotive 579
–maschinenantrieb 606
–phaseninhibitor 297
– -Sauerstoff-Vergasung 79f.
–separator Tafel 8/9
–turbine 93f.
–turbinenantrieb 605
Danner-Verfahren 234
Darrdichte 241
Datenfernübertragung 374
Datenverarbeitung, elektronische 495f.
–, integrierte 495
–, partielle 495
Datenverkehr, bidirektionaler 491
Dauer|betrieb 366
–brandofen 542
–magnet 360
–schwingfestigkeit 467
Davits 604
DCTL 405
DDR-Standards 722
deadweight 607
– all told 607
– cargo 607
Debye-Scherrer-Verfahren 471
Decca 384
Deckbrücke 533
Deckel|karde 675
–krempel 675
Deckemail 238
Decksbalken 602
Deckschicht (auf Plasten) 198
– (Straßenbau) 569f.
–form 652
Deckwerk 558, 560
Dederon 178, 673
Deinking-Verfahren 255
Defektelektronen 349
Deflagration 184
Dekatieren 693
Dengeln 265
Denitrierturm 162
Densitometer 650
Dentaleinheit 432, Tafel 49
Deplacement 607
Deponie 200
Derrickkran 340
Desinfektions|anlage 433
–kammer 433
Destillation 85f., 126, 159
–, fraktionierte 85f.
Detonation 184
Deuterium-Deuterium-Fusion 70
„Dewatering Fluids" 297
Dextrin 184
Diagonalreifen 596
Diamant|krone 15
–werkzeug 273
Diamid 164
Diaphragma-Verfahren 167
Diaprojektor 428
Dichte|sortierung 54
–steuerung 396
Dicht|polen 127
–stromförderung 330
Dichtung 308
Dichtungs|bahn 507
–mittel 505
–wand 21, 563
Dick|filmtechnik 402
–schichttechnik 402
Dienstprogramm (Rechent.) 498
Diesel|-Elektroaggregat Tafel 6
–kraftstoff 86
–lokomotive 579
–motor 91f., 605, Tafel 11
–triebfahrzeug 579
Differential 600
Diffusions|aluminieren 300
–schweißen 288
–transistor 400
–überzug (auf Stahl) 299
–verchromen 300
–verfahren 654
–verzinken 300
–vorgang 189
Digital|-Analog-Umsetzer 485
–ausgabeeinheit 497
–eingabeeinheit 497
–rechner 487ff., 496ff.
Diktiergerät 413
Diode 397
Diplexer 380
Dipol 389
Direkt|beschichtung 710
–druck 691
–farbstoff 183
–härten 295
–reduktion 111, 114f.
–spinnverfahren 679
Diskordanzfalle 41
Dispersion 191
Dispersionsfarbstoff 183
Distanzraster 643
DMA-Schaltkreis 493
DME 382, 383
Dolomit 216
Donator 349
Doppel|boden (Schiffbau) 602
–endprofiler Tafel 24/25
–kernrohr 15
–kreiselkipper 347
–leitung 395
–schneckenextruder Tafel 19
–stockbus 593
–stockwagen 581
Doppler|-Navigator 384, 385
– -Peiler 382
–radar 385, 454
– -VOR 382
Dorn 155, 191
Dornen 266
Dose 663, 664
Dosen|libelle 453
–spinnmaschine 677
–variometer 627
Dosierpumpe 97
Dotierung 399
Draht|bandförderer 326
–geflechtband 322
–heftmaschine 657
–putzkonstruktion 539
–rückstichheftung 657
–seil 321
–seilbahn 591
–straße 151
–widerstand 393
Drain 400
Dralon 175, 178
Dränrohrentwässerung 556
Dränung 556
Dreh|ankermagnet 360
–automat 278
–eisenmeßwerk 446
Drehen 277
Dreh|feld 357
–flügelmotor 317
–funkfeuer 382
–futter 292
–kolbenpumpe 97
–kondensator 353, 394
–kran 339
–magnetmeßwerk 447
–maschine 278
–meißel 277
–momentwaage 445
–rohrofen 166, 220, Tafel 20
–rostgenerator 78
–schemellenkung 599
–spulmeßwerk 446
–stabfeder 597
Drehstrom 353
–asynchronmaschine 357
–asynchronmotor 357
–kommutatormotor 358
–motor 357
–synchronmaschine 356
–synchronmotor 357
–transformator 360
Drehteller 329
Drehungszähler 699
Dreh|wähler 373
–werk 324
–widerstand 393
–zahlmesser 454, 628
Dreieckflügel 624

Dreieckschaltung 354
3-Exzeß-Kode 487
Drei|kreislaufschaltung 69
–messermaschine 658, Tafel 74
–punktregler 477
–radfahrzeug 593
–rollenmeißel 15
–stromspülung 90
3-Stufen-Verfahren 247
Drei|walzen-Blechbiegemaschine 264
–wegeventil Tafel 53
Drifttransistor 400
Drossel|klappe 479
–ventil 319
–verfahren 458
Druck|verfahren 650ff.
–bildmontage 647
Drucken (Textilt.) 691
Drücken 268
Drucker 655
Drücker 57
Druck|farbe 184
–filter 552
–flüssigkeitsspeicher 319
Druckform 648
–herstellung 642ff.
–rohlingsbearbeitung 647
–vergütung 650
Druckgas|generator 79
–kabel 364
–werk Tafel 5
Druck|guß 144
–kabine 625
–kessel (DK)-Bauweise 68
Druckluft|gründung 512
–heber 337
–pumpe 98
Druck|lüftung 545
–maschine 650
–messer 456, 628
–raumsystem 70
–röhren (DR)-Bauweise 68
–röhren-Siedewasser-Reaktor 68
–schalter 319
–schleuse 641
–stab 530f.
Druckstrom|erzeuger 315
–verbraucher 317
Druck|type 646
–umformen 265
–ventil 318
–verbraucher, pneumostatischer 317
–vergasung 79
–versuch 466
Drückwalzen 266
Druck|wasserreaktor 68f., Tafel 8/9
–wasserstoff-Raffination 86
–werk 650
–zerstäuberbrenner 89
DTL 405
Dualzahl 486
Dübel 515f.
Dübeln 244
Dublieren 675
Düngemittel, synthetische 169
Dunkelfeldmikroskop 423
Dünn|filmtechnik 402
–schichtschaltung 403
–schichttechnik 402
Dünnstromförderung 330
Duo|gerüst 150
–rollengerüst 152
– -Warmwalzgerüst Tafel 14/15
Duplikatformherstellung 650
Durch|druck 654
–drücken 266
–druckform 649
Durchfluß|messung 458f., Tafel 54
–mischer 190
Durchlaß|fähigkeit von Straßen 601
–richtung 365
Durchlauf|-Gewindewalzen 266
–mischer Tafel 14/15
Durch|schallungsverfahren 469
–wärmen 293
–ziehen 266f.
–zugshafen 617
Duroplaste 174, 187f.
Düsen|ruder 603
–spinnofen Tafel 23
–webmaschine 682
DWR 68
Dynamit 185f.
Dynode 463

E

„Early Bird" 638
Echo|graf 458
–lot 457f.
–meter 458
echte Drehung 676
Echtzeitbetrieb 495
Economiser 88
ECTL 405
Edel|metall 109, 124
–stahl 107
EEG 436
Effektivwert 352
Egrenieren 670
Eichen 442, 443
Eigen|ortung 381
–peilung 381
Eimer 663
–kette 332
Eimerketten|absetzer 333
–bagger 26, 332
Einachsschlepper 345
Ein-/Ausgabe-Puffer 491
Einbadätzung 649
Einbauelemente (Baut.) 541
– (Bergbau) 24
Einbrennlack 183
Eindicker 251
Eindrückdeckel 663
Eindrücken 266
Einetagenpresse 248
Einfahrgruppe 585
Einflugzeichen 386
Eingabe|einheit 488
–gerät 493
Eingefäßbagger 331
Einhalsen 267f.
Einhängen 659
Einheit 718
Einheitensystem, Internationales 718
Einheits|bohrung 305
–signal 497
–welle 305
Einheizung 542
Einkreislaufschaltung 69
Einkristall|ziehen 127
–züchtung 137
Einlaufbauwerke 551
Einphasen|motor 358
–transformator 359
Einprägen 266
Einpressen 290, 659
Einpreßsonde 46
Einreiben 706
Einreihenmotor 92
Einsatz|härten 295
–kohle 77
–stahl 107
Einschaltdauer 366
Einschienen|hängebahn 589
–standbahn 589
Einschlagmaschine 666, Tafel 76
Einschneckenextruder 209
Einschnitt 24
Einseitenbandübertragung 375
Einsenken 266, 279
Einspritz|motor 90
–verfahren 91
Einstechdrehen 277
Einstoff-Flüssigkeitstreibstoff 633
Einstrom|pumpe 316
–turbinen-Luftstrahltriebwerk 623
Einstufen|ätzmaschine Tafel 70
–ätzung 648
1-Stufen-Verfahren 247
Eintauch|bahn, aerodynamische 637
–korridor 637
Einwohnergleichwert 553
Einzelbuchstaben|gießmaschine 646
–setzmaschine 646
Einzel|fundament 510
–gut 320
–radaufhängung 596
Einzylinder-Ottomotor 92
Eisbrecher 610
Eisenbahn|betrieb 583
–brücke 533
–drehkran Tafel 37
–fahrzeug 577
– -Fernmeldeanlage 577
–kühlwaggon 103
– -Sicherungsanlage 576
–signalwesen Tafeln 90, 91
–wagen 581f.
Eisen(III)-chlorid 169
Eisenerz 111
–aufbereitung 59
–konzentrat 111
Eisen|-Gußwerkstoff 108
– -Kohlenstoff-Diagramm 294
–metallurgie 111
–schrott 111
–schwamm 114
–werkstoff 105, 107
Eiskühlung 100
Eiweißleim 184
EKG 435, 436
Elaste 172, 177, 508, 202ff.
Elastwerkstoffe 202ff.
Elastizität der Speichergesteine 42
elektrische Heizung 542
–Maschinen 356

elektrischer Abscheider 58
elektrische Triebfahrzeuge 580
elektrische Uhr 409
Elektrizitäts|versorgungsanlage 548f.
—zähler 448
Elektro|akustik 389ff.
—antrieb 606
—auto Tafel 63
—bagger Tafel 38
—boiler 547
elektrochemische Elemente 72
Elektro|chirurgie 437
—diagnostik 437
—druck 655
—durchlauferhitzer 547
—energie 61
—enzephalograf 436
—erosion 284
—filtration 161
—fotografie 654
—gasschweißen 286
—herd 366
—installation 364
—isolationsvermögen 189
—kardiogramm 435, 436
—karren 345
—keramik 229
—koagulation 437
—lichtbogenofen 119
—lokomotive 580, Tafel 61
Elektrolyse 167
Elektrolytblei 128
Elektrolyte 348
Elektrolyt|kondensator 394
—kupfer 127
—nickel 129
—silber 130
—zähler 448
—zink 129
—zinn 129
Elektromagnet 360
elektromagnetische Wellen 356
Elektromotor 357ff., 595
elektromotorische Kraft 349
Elektronen|blitzgerät 427
—mikroskop 423
—röhre 396ff.
Elektronenstrahl|ätzung 405
—bearbeitung 284
— -Bedampfungsanlage Tafel 14/15
—mehrkammerofen 123
—ofen 123
—oszillograf 450
—röhre 397
—schweißen 288
Elektroniederschachtofen 114
Elektronik 392ff., Tafeln 41, 42, 44, 45, 87
Elektro|ofen 127
—phoresegerät 440
—porzellan 229
— -Schlacke-Schweißen 287
— -Schlacke-Umschmelz-Verfahren 122f.
—sortierung 55
—speicherfahrzeug 595
— -Stahl 107
elektrostatische Beflockung 198
elektrostatisches Beschichten 194
Elektro|striktion 74
—tauchlackierung 299
—technik 349ff.
Elektro|tomie 437
—wärme 366
Elementstrahler 389
Elevator 326
E-Lok 580, Tafel 61
Elongatorverfahren 155
Eloxalverfahren 299
Elysieren 283
Elysier-Schleifen 284
Email 214, 238f.
—auftragen 239
—einbrennen 239
—herstellung 239
Emaillieren 299
Emissions|-Elektronenmikroskop 465
—mikroskop 423
Emiter 399
EMK 349
Empfänger 377
Empfangsantenne 388
Empfindlichkeit 444
Emscherbrunnen 554
Emulsion 181, 291
Emulsionspolymerisation 173
Emulgator 181
Emulsol 181
Endoskop 433
Energie|bedarf 61
—maschinen 87ff.
—rückgewinnungsanlage 71
—technik 61ff., Tafeln 5–7, 81
—träger 75
—versorgung 363
Entaschungsanlage 62
Enteisenung 552
Entenschnabel 347
Entfernungsmeßsystem 382
Entfleischmaschine 704, Tafel 80
Entgaser 64
Entgasungskammern 76
Entgasung von Kohle 76
Entgrannen 707
Enthaarmaschine 704
Enthalpie 87
Enthärtung 552
Entkälken 704
Entleerungsschieber 553
Entmanganung 552
Entnahme|gegendruckprozesse 64f.
—kondensationsprozesse 65
Entsäuern 552
Entschlichten 690
Entschwefelung 86
Entspannungsdüse 632
Entstauben 58
Entstipper 255
Entwässern 21, 57, 692
Entwässerung (von Straßen) 568
Entwässerungsmaschine 251
Entwicklungsfarbstoff 183
Entwurfselemente für Landstraßen 565
Episkop 428
Epitaxieplanartransistor 400
Epoxidharz 175
Erd|bau 508ff., 514
—damm Tafel 59
—farbe 182
Erdgas 40ff., 75f., 84, Tafel 16/17
—gewinnung 40
Erd|hochbehälter 552
—kabel 363
Erdöl 40ff., 75
—aufbereitung 86
—begleitgas 76
—destillation 85f.
—entstehung 40
—gewinnung 40, 45f., Tafel 4
—lagerstätten 41f.
—muttergestein 41
—tanker 609
—verarbeitung 85, Tafel 16/17
Erdstaudamm 563
Erhärtungs|beschleuniger 505
—verzögerer 505
Erkundungs|blindschacht 20
—strecke 20
—verfahren, bohrtechnisches 14
Ermüdungsbeständigkeit 212
Erosions|maschine Tafel 32
—perforation 44
—schutz 557
Erspinnen 674
Erwärmungsschweißen 698
Eruptionskreuz 44
Erztagebau 29, Tafel 4
„ESSA" 638
Eßkohle 75
Estakade 18
Etagen|heizung 543
—presse 246, 249
— -Röstofen 161
Etikettiermaschine 669
ETL 623
Explosionsplattieren 300
Explosiv|schweißen 288
—stoff 184
—umformung 269, Tafel 29
Extensionsgerät 431
Extrahieren 159
Extrudieren 190, 209
Extrusionsblasen 193
Exzenter|presse 261
—schwingsieb 53

F

Fabriktrawler 609
Fachbereichstandards 722
Fachen 675, 680
Fachwerkträger 516, 531
Fahrbahn 533
—markierung 567
Fahr|draht 590
—gastschiff 615
—gestell 595f.
—lader 38
—motor 580
—ordnung 575
—plan 584
Fährschiff 608
Fahr|sperre 577
—stuhl 341
Fahrtmesser 627
Fahrwerk (Flugzeug) 595, 626
— (Fördert. 324f.
Faksimiletelegrafie 373f.

Faktisse 205
Fakturiermaschine 414
Falle, stratigrafische 41
Fallhammer 263
Fällung, intermetallische 126
Fällungsmittel 552
Falschdrahtverfahren 679
falsche Drehung 676
Faltschachtel 663
—klebemaschine Tafel 75
Faltwerke 517f., 525
Falz|automat Tafel 73
Falzen 244
Falz|kremper 536
—maschine (Ledert.) 705
—siegelautomat Tafel 74
—ziegel 536
Fang|gerüst 518
—trawler 609
Farb|artsignal 378
—auszug 644
—auszuggerät Tafel 70
—differenzsignal 378
Färbeapparat 691
Färben (Holz) 244f.
— (Leder) 691
— (Papier) 256
— (Rauchware) 707
Farb|fernsehen 378
—filterung 644
—glas 236
—lack 184
—spritzen (Polygrafie) 655
Farbstoff 182
—klasse 183
—, saurer 182
—, substantiver 183
Farb|teileroptik 379
—trocknung 184
—werk (Druckmaschine) 650
Faschinen 557f.
Faser|baustoffe 506f.
—harzspritzverfahren 194
Fasern, vollsynthetische 178
Faser|platte 244, 248f.
—sättigungspunkt 241
Faserstoff 252
—eigenschaften 700
Faservlies 249, 687
Fassaden|element Tafel 57
—lift 341
Faul|becken 555
—raum 555
Fayence 228
FBAS-Signal 378
Feder 306
—manometer 456
—stahl 107
Federungselement 597
Federwaage 455
Fehler, systematischer 444
—, zufälliger 444
—klasse 444
Feilen 276
Feilenformen 276
Feilmaschine 276
Fein|bohrmaschine 280
—drehen 273
—garn 677
Feinheit 699
Fein|kalk 216
—keramik 222, 228
—kohle 59
Feinmechanik 407ff.
— -Optik Tafeln 46, 47
feinmechanische Geräte 421ff.
Fein|schmieden 265
—schmiedemaschine 263
—seife 180
—spinnen 677
Feinstdrehen 273
Feinsteinzeug 228
Feinstoff (Holzstoff) 252
Feinstruktur-Prüfverfahren 470
Feinzeigermeßschraube 453
Feld|effekttransistor 400
—elektronenmikroskop 423
Felderblock 577
Feld|stecher 424
—untersuchung 509
Felge 596
Felle 702
Fenster 541
Fernleitung (Elektrot.) 363
— (Erdöl, -gas) 82f.
Fernrohr 423, Tafel 46
—brille 421
Fernschreib-Kode 487
Fernseh|bildröhre 398
—kamera 378, 379
—norm 377
—rundfunk 377
—rundfunkempfänger 380
—signal 377
—technik Tafel 92
Fernsprecher 371
Fernsprech|kanal 482
—netz 372
—vermittlungseinrichtung Tafel 43
Fernwirktechnik 481
Ferrit|antenne 376, 388
—keramik 229
—rahmen 388
Ferro|mangan 114, 133
—molybdän 133
—nickel 129
—silizium 114
—vanadin 134
—wolfram 134
Fertigteilbauweise 529
Fertigungs|ablauf 302
—einrichtung, automatisierte 303
—hilfsstoff 181
—prinzip 503
—technik 260ff.
—verfahren 260
Festkörper|laser 430
—schmierstoff 181
Fest|propeller 606
—punktschweißmaschine Tafel 33
—stellbremsanlage 597
Feststoff|analyse 462
— -Raketentriebwerk 632
—triebwerk 631
Festwert|regelung 476
—speicher 405, 489
Festwiderstand 353
FET 400
Fettalkoholsulfat 180
Fette, technische 179
Fetten (Rauchware) 706
Fett|härtung 179
—kohle 75
—öl 291
—säuren 179
—spaltung 179
Feuchten 259
Feucht|mittel (Offsetdruck) 652
—werk 652
Feuer 611
—löschanlage 547
—melder 391
—schiff 610
Feuerung 88
Feuerverzinken 299
Film|abtaster 377
—druckmaschine 691
—kondensation 95
—montage 647
—technik 427ff.
—transporteinrichtung 426
Filterbrunnen 21
—entwässerung 21
Filtration 57
Filz 688
Findlingsmauerwerk 519
FIR 630
Firnis 183
Firstenstoßbau 35
Fischereischiff 609
Fischer-Tropsch-Synthese 171
Fischsichtgerät 458
Fixieren 693
Flach|bahnhof 586
—bahnregler 393
—batterie 72
—beutel 662
—brunnen 551
—decke 524
—druck 651f.
—druckform 652
Flächen|antenne 388
—diode 399
—elemente im Tagebau 23
—ruder 603
—rüttler 569
—schleifmaschine 282
—tragwerk 531
Flach|gründung 510
—prägen 265
—preßverfahren 248
—querwalzen 266
—riementrieb 310
Flachs 670, 678
Flach|strickmaschine 685, Tafel 77
—wagen 582
—walzen 149, 264
Flämen (Häute) 703
Flammen|feldlöten 289
—fotometer 440
—härten 295
—überwachungsanlage 392
Flamm|kohle 76
—ofen 127
Flammrohr|-Dampferzeuger 89
— -Rauchrohr-Dampferzeuger 89
Flammspritzen 194
Flasche 663, 665
Flaschen|geruchverschluß 548
—herstellung 232

Flaschenzug 337
Flexibilität 212
Flexodruck 651
–farbe 184
Fliehpendelmeßwerk 455
Fliesenbelag 540
Fließ|fertigung 302, 503
–kanal 193
–pressen 262, 267
–preßverfahren 664
–reihe 303
–span 271
–straße 303
–temperatur 188
Flip-Flop 480, 491
Float-Glas-Verfahren 234
Flor 675
Flosse 625
Flotation 56
Flotationszelle 255
Flotte, technische 610
Flöze 31
Fluchtraketentriebwerk 633
Flugbahn 636
–korrektur 636
– -Rechengerät 634
Flugbahnen von Raumkörpern 635
Flügel|radpropeller 606
–spinnmaschine 678
–zellenpumpe 316
Flugführung von Raumkörpern 636f.
Flughafen 630
–parameter 630
Flug|informationsgebiet 630
–lageregelung 636
–motor 92
–regler 628
–stabilisierung 633
–turbinenkraftstoff 86
–werküberwachung 628
Flugzeug|ausrüstung 626
–baugruppe 624
Flurförderer 344
Flurförder|maschine 343
–zeug 344, 588
Fluß|bau 557
–dichte 349
Flüssig-Flüssig-Extraktion 126
Flüssigerdgas 81
–speicherung 84
Flüssiggas 76, 86
–tanker 609
Flüssigkeits|analyse 461
– -Glasthermometer 459
–kühlung 594
–laser 430
–manometer 457
– -Raketentriebwerk 632
–trieb 311
–triebwerk 631
Flüssigkristallanzeigeelement 401
Fluß|kanalisierung 558
–mittel 289
–regelung 557
–wasserkraftwerk 71
Flyer 676f., Tafel 77
Folge|regelung 476
–steuerung 479
Folien 191, 664
–deckung 536
Foliefaden 674, 679
Fördereinrichtung 293
Förderelemente 24
Förderer, hydraulischer 330
–, pneumatischer 329
Förder|gefäß 344
–gestell 344
–gut 320
–korb 344
–mittel 320
–rate, optimale 44
–rinne 330
–schnecke 191
–sonde 44
–technik 320ff., Tafeln 37–40
Förderung 27
– aus Meereslagerstätten 46
–, intermittierende 45
Förderverfahren 45
Formänderung, elastische 466
Formatschneiden 259
Form|automat 146
–fixieren 698
Form-Füll-Verschließmaschine 666, 667, Tafel 76
Formgebung (Glas) 231
– (Keramik) 224
– (Pulvermetallurgie) 139
–, plastische 224
Form|guß 143
–kasten Tafel 28
–leichtbau 581
–maschine 665
–pressen 265
–sand 145
–schleifverfahren 282
–schlichten 290
–stoff 145
Forschungssatellit 637
Fortinbarometer 456
FORTRAN 495
Foto|ätztechnik 404
–diode 399
–element 462
–halbleiter 463
–kamera 424
–maskentechnik 400
–meter 440, 462
–satz 646
–transistor 400
–tropie 236
–widerstand 393
–zelle 462
Föttinger-Wandler 600
Foulard 691
Fracbehandlung 46
Fracht|-Fahrgast-Schiff 607
–schiff 608
Fraktion 159
Francis-Turbine 92f.
Frasch|pumpe 160
– -Verfahren 161
Fräsen 280f.
Fräsmaschine 281
Freibordmarke 606
freies Liegende 24
Frei|fallmischer 190
–formen 265
Freiformschmiede|hammer 263
–presse 262
Freihafen 612
Frei|laufeinrichtung des PKW 600
–legen 514
–leitung 363
–luftschaltanlage 363, Tafel 41
–spiegelleitung 554
–strahl-Turbine 93
–winkel 272
Fremd|ortung 381
–peilung 381
Freone 172
Frequenz 352, 355
–messung 451
–modulation 374
–multiplex-Verfahren 482
–regelung 377
–teilung 372
–umformer 364
Friktion 207
Frisch|ölschmierung 312
–wasserkühlung 63
Front|antrieb 599
–fixieren 698
–lader 347, Tafel 40
–verhieb 26
Frost|schutzmittel 505
–trawler 609
Frühholz 241
Fügen (Fertigungst.) 260, 284, Tafeln 33, 34
– durch Umformen 290
– durch Urformen 290
– (Textilt.) 695, 715
Fugen|ausbildung (Straßenbau) 570
–hobeln 270
–mörtel 505
Füge|technik (Holz) 244
–verfahren (Plaste) 196
Führungs|größe 475, 479
–steuerung 479
–übergangsfunktion 475
Füllen (Papier) 256
Füller (Gummi) 205
Füll|maschine (Verpackungst.) 666, 668
–standsmessung 457
–stoffe (Elaste) 205
–stoffe (Plaste) 198
–stoffe (Straßenbau) 568
–stoffe (Synthetiks) 709
Füll-Verschließmaschine 666
Fundament 510
–platte 510
fündig 13
Funkelfeuer 611
Funk|feuer 382
– -Höhenmesser 627
–kompaß 629
–koordinate 381
–mast 534
–navigation 381, 610
–ortung 381ff., 637
–peilung 381
–strecke 482
Funktions|bildner 483
–geber 483
–generator 483
Funkwellen 356
Furnier 244f.
–trocknung 243

Fußboden 538f.
—belag 539
—estrich 538
—spachtelbelag 539
Futtertür 541

G

Gabelstapler 346
Gallium 135
Galvanisieren 198, 301
Galvano (Polygrafie) 650
Gänge (Bergbau) 31
Ganz|bandbuchdecke 659
—druckform 647
Garn 674
Gas 75f., 86
—analyse 461
—behälter 83
—benzin 86
—beton 525
—beton-Wandbaustein 521
—chromatograf 461
—durchlauferhitzer 546
gasdynamische Schubvektorsteuerung 634
Gas|einpressen 46
—entladungslampe 367
—erzeuger 622
—erzeugung 76ff.
—fernleitung 82
—flammkohle 75
—kreislaufhydrierer 80
—liftverfahren 45
—motor 90
—öl 85f.
—schweißen 287
—speicherung 83f.
—silikatbeton 506
Gasturbine 94f., 595
—anlage Tafel 11
—antrieb 606
—kraftwerk 65
—triebfahrzeug 579
—triebwerk 622, Tafel 95
Gas|verbundnetz 83
—versorgungsanlage 548
Gate 400
Gattersägemaschine 245
Gaußsches Okular 422
Gebäudeentwässerung 547
Geber 443
Gebirge (Bergbau) 31
Gebrauchstemperatur 203
„gebrochener Verkehr" 572
gedeckter Wagen 581
Gefällebahnhof 586
Gefäß|barometer 456
—heberbarometer 456
—prothese 434
Gefrierschiff 609
Gegen|druckprozesse 64
—lauffräser 280
—rufklingelanlage 391
—schlaghammer 263
Gehängeförderer 327
Gehren 244
Gei 604
Geiger-Müller-Zählrohr 463
Gelatinerelief 648
Gelenk 532
—bus 593
—welle 308
Gemengeaufbereitung 230
Genauigkeitsklasse 444
Generalauftragnehmer 502
Generator 78
—gas 78
Geologie 12
geologisches Mächtigkeitsverhältnis 21
Geo|mechanik 31
—physik 12
geo|stationärer Satellit 387
—technische Sicherheit 30
—technologisches Verfahren 35
Geradeausempfänger 376
Geräte|einheit 639
—sicherung 361
Geräuschmeldeanlage 392
Gerben 705f.
Gerb|faß 704
—mittel 705
Germanium 135
Geröllsperre 557
Geruchverschluß 547f.
Gerüstwand 538
Gesamt|strahlungspyrometer 460
—tragfähigkeit 607
Geschirrkeramik 228
geschlossener Kreislauf 63
Geschoßhubverfahren 530
Gesenk 265
—biegen 268
—formen 265
—schmieden 265
—schmiede-Kurbelpresse Tafel 30
Gesperr 309, 407
Gestängepreventer 17
Gestellmotor 581
Gestricke 684
Getriebe 309, 323
—automat 600
Gewebe 681f.
Gewichtsstaumauer 562
Gewinde|bohrer 279
—drücken 268
—formen 266
—fräsen 281
—schneiden 277, 279
—wirbeln 281
Gewinnungs|elemente (Tagebau) 24
—verfahren (Bergbau) 38
Gewirke 684
Gezeitenkraftwerk 72
Gicht 112
—gas 114
Gießen 192, 210, 224, 232
Gießereikran 339
Gießform 143f., 146
— (Setztechnik) 646
Gieß|gut 143
—karussell Tafel 28
—kessel (Setztechnik) 646
—prozeß 104, 143
—strahlentgasung 122
—technologie 191, 193
—verfahren 193
Gießvorgang 147
Gips 214f.
— -Schwefelsäure-Verfahren 221
Gitter (Elektronenröhre) 397
GKW 593
Glanzverchromen 301
Glas 214, 229ff.
—bildner 230
—eigenschaften 235ff.
Glasfaser 238, Tafeln 23, 24
— -Lichtleiter Tafel 44
—vlies Tafel 23
Glas|herstellung 214
—rohstoffe 230
—schmelzwanne 231
—seide 234, 674
—sorten 237
—werkstoffe 235
—zustand 188
Glatt|deckprahm 615
—drücken 266
—rollen 266
—walze 569
—walzen 264
Glättwerk 257
Glaubersalz 163
Gleich|druckturbine 92
—lauffräser 280
—richter 365
—spannungskompensator 449
Gleichstrom 352
—generator 358, 359
—maschine 358
— -Meßbrücke 449
—motor 359
—tachometer 455
—zähler 448
Gleis 572
—abstand 573
—bildstellwerk 576
—bremse Tafel 61
—gruppe 585
—joch 572f., Tafel 61
—kettenschlepper 594
—rückmaschine 27f.
Gleit|bauverfahren 528
—fokusglas 421
—lager 307
—schalung 528
Gleitschalungs|bauweise Tafel 56
—fertiger Tafel 60
Gleit|wegsender 386
—ziehen 267
—ziehbiegen 268
Gliederbandförderer 326
Glimmentladung 367
Glimmerkondensator 393
Glimmlampe 367
Glocken|bodenwascher 77
—tonne 611
—verfahren (Baut.) 529
Gloverturm 162
Glüh|katode 367
—lampe 367
—phosphat 170
—verfahren (Fertigungst.) 294
Glutin-Leim 184
Glykoldinitrat 185
Glyzerin|ester 179
—trinitrat 185
Gnomzelle 72
Gold 130

Graben|aufschluß 25f.
–bagger 332
–einstau 556
–entwässerung 556
Gradierwerk 166
Granulat 190
Granulierschneckenpresse 209
Granulierung 189
Grau|guß 108
–kontrastfotografie 642
Gravieren 235
Graviergerät 645
gravimetrische Messungen 13
Gravur 645
Greifer 336
–rechen 554
–schützwebmaschine 682
–webmaschine 683
Grenz|schalter Tafel 54
–teufe, ökonomische 21
–wertmelder 436
Grisuten 178
Grob|keramik 222, 226
–steinzeug 227
–struktur-Radiografie 467f.
–vakuumlötung 289
Großbohr|lochsprengung 29
–pfahl 511
Größensystem 694
Groß|flammofen 127
–integration 405
–pflastersteine 569
–rundstrickmaschine 686, Tafel 78
Großtafel|bauweise 529
–schalung 528
Gruben|bau 31
–gebäude 32
–guß 145
–klima 39
Grund|ablaß 564
–bau 508ff.
–bruch, statischer 510
–email 238
–fehler 444
–operation, physikalische 159
–schleppnetz 609f.
–schwelle 558
–speicher 84
–stromkreis 351
–stückentwässerung 547
Gründung (Straßenbau) 568
Gründungs|planum 568
–tiefe 510
Grundwasser 550
–absenkung 514
Grundwehr 562
Gruppenbearbeitung 302
GTKW 65
Guano 169
Gully 554
Gummi 202
–feder 578
–federantrieb 581
–fördergurt 322
–gifte 203
–linse 425
–radwalze 569
–schichtenlager 532
–schnittwerkzeug 270
–topflager 532
Gunn-Element 401
Gurdynamit 186
Gurt 517
Gurtband 322
–förderer 325
Gürtelreifen 596
Guß|asphalt 570
–eisen 108, 506
–gefüge 105
–putzen 147
–werkstoff 105
–zustand 105
Güter|kraftwagen 593
–wagen 581
Gütezeichen 722
Gutgruppe 661
Guttapercha 203
Gyrobus 595

H

Haar 671
–hygrometer 460
Haber-Bosch-Verfahren 164
Hack|maschine 252
–schnitzel 242, 252, Tafel 24/25
Hafen 617
–bau 560
–becken 560
–klapptor 559
–ofen 230
–schlepper 610
Hafnium 135, 137
Haftschale 421
Hahn 313
Hakaphos 170
Haken 335
–schraube 573
Hakerschiene 675
Halb|bandbuchdecke 658
–hartgummi 206
–gewebedecke 659
Halbleiter 349
–bauelement 398ff.
–diode 398
–laser 430
–stromrichter 365
–werkstoff 134
Halb|tonaufnahme 643
–trockenverfahren 219
Halbzeug|herstellung (Metallurgie) 153
–fertigung 147
–gestalt (Plaste) 188
Halbultrabeschleuniger 206
Halde 28
Halden|rückgewinnungsgerät 333
–schüttgerät 333
Hall-Effekt-Element 401
Hallendach 517
Halogenglühlampe 367
Haltebremse 323
Halten 294
Haltepunkt 575
Hammer|brecher 52
–mühle 52
Handelshafen 617
Hand|formen 146
–kolbenpumpe 97
–laufkran 338
Hand|lochkarte 415
–satz 645
–steuerung 479
Hanf 671
Hangaufschluß 22
Hänge|brücke 534
–gerüst 518
Hanger 604
Hängewerk 516
Hardware 492, 498
Harnstoff 164
Hartblei 128
Härte|kontrastschicht 649
–messung 466
Härten 235
Härteverfahren, chemisch-thermisches 295
– thermisches 295
Hart|gestein 504
–gummi 203, 206
–guß 108
–löten 289
–paraffin 181
–porzellan 228
–tauchlöten 289
–verchromen 301
Haspelkufe 690
Haufwerksporigkeit 506
Haupt|bahn 574
–deck 602
–schnittbewegung 272
–signal 576
–stromkreis 361
–umspannwerk 362
Haus|anschlußsicherung 548
–dach 517
Häute 702
Hebdrehwähler 373
Hebebühne 337, 340, Tafel 35
Hebelwaage 455
Hebemagnet 360
Heber 336
–, pneumatischer 337
–barometer 456
Hebezeug 334, 336
Hecheln 675
Hecht (Häute) 703
Heck|anker 604
–antrieb 599
Heftautomat Tafel 74
Heften 657
Heiß|beschichtung 711
–dampf 87
–dampfturbine 94
–gasschweißen 196
–leiter 349, 393
–pressen 225
–wasserbereiter 366
Heiz|elementschweißen 196
–fläche 544
–keilschweißen 196
–kissen 366
–kraftwerk (HKW) 61, 64
–lüfter 543
–öl 86
Heizungsanlage 542
Heizwert 62
Heliogravüre 654
Helligkeitssignal 378

Hemmschuh 586
Hemmung (Uhr) 408
Heptode 397
Herd 55
–guß 145
–ofenverfahren 118
Herz|-Lungen-Maschine 434
–schrittmacher 434
–stück 574
„Hettal"-Dach 537
Hetzer-Träger 516
Heultonne 611
HF-Schweißstanzen 715
HGÜ 362
Hilfs|kontakt 361
–regelgrößenaufschaltung 476
–stellgrößenaufschaltung 476
–stoff (Fertigungst.) 273, 282, 285
Hinter|drehmaschine 279
–kleben (Buchblock) 658
Hitzdraht|meßwerk 447
–verfahren 459
Hitzeschild 637
HKW 64
Hobelmaschine 275
Hobeln 274
Hoch|aufladung 91
–behälter 552
Hochdruck (Polygrafie) 651
–additives 182
–ätzung 648
– -Preßformmaschine Tafel 28
–reaktor Tafel 16/17
–spaltung 80
–vorwärmer 63
Hoch|elastizität 212
–energieumformung 269
Höchstfrequenz|-Bauelement 396
–resonator 396
Hoch|frequenzschweißen 196, 698
–geschwindigkeitsschleifen 282
–löffelbagger 331
Hochofen 111f., Tafel 12/13
–prozeß 112
–schlacke 114
–zement 217
Hoch|polymere 187, Tafeln 18, 19, 84
–seeschlepper 610
Hochspannungs|gleichstromübertragung 362
–leitung 362
Hochtemperatur|entgasung 76
–prozeß (Sintern) 214
–reaktor 69
–verkokung 77
Hoch|vakuumpumpe 97
–wärmen (Fertigungst.) 293
Hochwasser|entlastungsanlage 564
–rückhaltebecken 562
höffig 13
Höhe über Grund 626
Höhen|leitwerk 625
–messer 626
Hohl|glas 232
–kastenträger 531
–körperfertigung 193
Hohlleiter 395
–resonator 396
Hohlspiegel 417
Hohl|ziegel 520
–zug 267
Holländer 255
Holografie 427
Holozellulose 241
Holz 75, 240, 506
–bau 515
–faserwerkstoff 248
–fußboden 539
–gerüst 518
–haus 518
–masse 240
–polyose 241
–spanwerkstoff 247
–stoff 250
–technik 240ff., Tafeln 24/25, 85
–treppe 540
–werkstoffe 242
–werkstoffplatte 245
–wolle-Leichtbauplatte 248
–verbindungen 515
Homogenisierungs|glühen 296
–vorgang 189
Honen 282
Hopperbagger 610
Hör|gerät 437
–hilfe 437
Horizontal|filterbrunnen 551
–schmiedemaschine 263
–stromklassierer 53
– -Vertikal-Lot 458
–walzgerüst Tafel 14/15
Hornparabolantenne 389
Hörrundfunk 374
–empfänger 376
Hornstrahler 389
Hot-Box-Verfahren 145, Tafel 28
HP-Schale Tafel 56
Huckepackverkehr 587
Hubkolben|maschine 90
–motor 91
–pumpe 97
–verdichter 99
Hub|schrauber 619f., Tafel 66
–tisch 341
–verschluß 562
–werk 324
Hüll|kasten 527
–trieb 310
–wand 537
Hülsen|fundament 510
–puffer 578
Hummerscherenlader 347
Hütten|zink 129
–zinn 129
Huygenssches Okular 421, 422
HV-Lot 458
HV-Schraube 530
HWL 248
Hybrid|rechner 485
–triebwerk 633
Hydrate 47
Hydratationswärme 521
Hydraulefaktoren 215
Hydraulik 313ff.
–anlage 628
Hydrieren 87, 179
Hydro|formylierung Tafel 16/17
–gasification 79
Hydroglobus 534, 552
–jet 606
–metallurgie 125
hydrometallurgischer Prozeß 104
Hydro|monitor 515
–phore 552
–statik 314
–vergaser 80
–vibration 513
–zyklon 53, 253, 255, Tafel I
Hygas-Verfahren 79
Hygrometer 460
Hypergole 633
Hypsometer 456

I

IEC-BUS 493
IGT-Biogas-Verfahren 81
IKW 64
Imitatgarn 677
Immersionsobjektiv 422
Imperial-Smelting-Verfahren 129
Imprägnieren 689
Impuls|-Echo-Verfahren 469
–eingabeeinheit 497
–höhenmesser 385
–radar 384
–radargerät 454
–satz 631
–spannungsprüfgenerator Tafel 41
–verfahren 384
Inchromieren 300
Indanthrenfarbstoff 182
Indikator 414
Indirektbeschichtung 710
indirekter Flachdruck 652
– Hochdruck 651
– Umschlag 587
Indium 135
Induktions|gesetz 350
–härten 295
–lötung 289
–meßwerk 446
–ofen 120
–schleife 482
–sonde 629
–tiegelofen 120
–zähler 448
Indusi 577
Industrie|fernsehen 380
–hafen 612
–kraftwerk (IKW) 61, 64
–roboter 500, Tafel 33
induzierte Emission 429
Inkrementalverfahren 499f.
Information 369, 473
Informations|ausgabe 481
–eingabe 480
–nutzung 481
–quelle 369
–senke 370
–technik 369
–übertragung 369
–verarbeitung 480
–zwischenträgerherstellung 642, 646
Infrarotstrahler 543
Inhalationsgerät 434
Inhibitoren 181
Initialsprengstoff 186

Innen|mischer 207f.
–raum-Schaltanlage 363
–rundschleifmaschine 282
–verkippung 28
–wandraumerhitzer 542
innere Spannung 197
in-situ-Verbrennung 47
Instrumenten|brett 601
– -Lande-System 386
Integralbuchdecke 658
integrierter Schaltkreis 403ff.
„Intelsat" 638, Tafel 43
Interface 492f.
Interferenz 420
–mikroskop 423
Interferometer 382
Internationales Einheitensystem 718
International Organization of Standardization 722
interplanetare Übergangsbahn 635
Interrogator 383
Interzeptor 625
Investitionsbauleitung 502
Ionenimplantation 400, 405
Ionisationskammer 463
Irisblende 425
ISO 722
Isolator 363
Isolierstoff 348
Isotopen|batterie 74
–diagnostik 439
–therapie 439
Iwanow-Verfahren 429

J

Jute 671, 678
Jacquard|maschine Tafel 78
–webmaschine 682
Jagdflugzeug 619, Tafel 66
Jahreszuwachs (Holz) 241
Jetlift 49
Jigger 690
Justieren 442, 443

K

Kabel 363, Tafel 42
–kran 340
–schlagseil 321
–ummantelung 191
Kabinenbahn 590
Kabotage 613
–fahrt 607
Kachelofen 542
Kadmium 109, 131
Kainit 170
Kalander 259, Tafel 19
–anlage 711, Tafel 79
–fließstrecke 209
Kalandrieren 191, 209, 693
Kaldo|-Rotor 117
– -Verfahren 117
Kaliammonsalpeter 170
Kalibrieren 153, 442
Kalibriereinrichtung 191
Kali|dünger 170
–feldspat 223
Kaliumkarbonat 167
Kalk 214, 216
–ammonsalpeter 170
–brennen 216
–dünger 170
–hydrat 216
–hydratverfahren 552
–sandstein 520
–schachtofen 216
Kalkstein 216, 224
–tagebau Tafel 1
Kalkstickstoff 165
Kalorimeter 461
Kalt|auslagern (Gußeisen) 296
–bandstraße 151
–beschichtung 710
–bitumen 568
–dach 536
Kaltdampf|maschine 100
– -Kompressionskältemaschine 101
Kältemaschine 100ff.
–, thermoelektrische 100
Kälte|maschinen-Kreisprozess 100
–speicherung 102
–technik 100ff.
–transport 102
Kaltformgebung 106
Kaltgas|düse 636
–maschine 102
Kalt|kautschuk 204
–nieten 289
–pilgern 156
–preßschweißen 288
–röste 670
–stauchautomat 262
–umformung 148, 196
–walzen 151f., 156
–wasserversorgungsanlage 546
Kalzinator 218, Tafel 16/17
Kalzinieren 125
Kalzium|karbid 170
–zyanamid 165
Kamelhaar 672
Kämmen 675
Kammer|pfeilerbruchbau 34
–trocknung 243
Kamm|garn 677, 678
–zapfen 308
Kanalbrücke 559
Kanalisation 553ff.
Kanal|trockner 243
–tunnel 558
Kaolin 223
Kapazitätsdiode 399
Kapitalen (Polygrafie) 658
Kaplan-Turbine 92f., Tafel 7
Kaprolaktam 178
Kapselfedermanometer 456
Karbide 170
Karbidofen 171, Tafel 16/17
Karbonisieren 677, 690
Karborundum 171
Karburierung 80
kardanische Lagerung 634
Kardieren 675, 677
Karkasse 596
Karnallit 170
Karosserie 600
Karrenbalken 714
Kartieren, geologisches 13
Karton 662
–umschlag 658
Karusselldrehmaschine 278, Tafel 31
Kaschierung 192
Kaschmirwolle 672
Kasein-Leim 184
Kaskadenregelung 476
Kassettenrecorder 391
Kasten 330
–formen 145
Katode 396
Katoden|schutz 297
–strahlröhre 398
Kautschuk, synthetischer 177
–mischung 202
–regenerat 213
Kaustifizieren 254
Kaverne 36
Kegel|brecher 51
–kupplung 309
–lochapparat 155
–mühle 255f., Tafel 26/27
–radtrieb 310
Keil 306
–riementrieb 310
–winkel 271
Kellerspeicher 491
Kenngrößen für Raketensysteme 631
Kenterwinkel 603
Keramik 214, 221ff., Tafel 22
–erzeugnisse 214
–kondensator 393f.
–spritzen 299
–technologie 224
Kerben 266
Kern (Gießprozeß) 145, Tafel 28
–bohren 14
–bohrgarnitur 15
Kernbrennstoff 66f.
–zyklus 67f.
Kern|energieantrieb 606
–formmaschine 145
–fusion 70
–härten 295
–kraftwerke 65, 69, Tafeln 8/9, 53
–mantelfaden 674, 679, 680
–reaktor 67ff.
Kernrohr 15
–garnitur 16
Kern|schießmaschine Tafel 28
–seife 180
–spaltung 66f.
–stopfmaschine 145
–strahlungsmeßgerät 439
–transformator 360
Kessel|druckverfahren 243
–speisewasser 87, 550
Kette (Textilt.) 681
Ketten (Fördert.) 321
–aufgeber 330
–kneifer 604
–nuß 322
–rad 322
–reaktion 66ff.
–trieb 310
–winde 324, 327
–wirkmaschine 686
Kicker 709

Kiel 602
Kies 505
—aufbereitung 59
Kieselglas 230, 237
Kies|gewinnung Tafel 1
—sandlagebau 28
Kilowattstundenzahler 448
Kippe 27
Kippeinrichtung Tafel 39
Kipper 347, 588, Tafel 39
Kippzähler 458
Kiste 665
Kitt 508
KKW 65
Klappbrücke (Eisenbahn) 581
Klappe 313
Kläranlage 555f.
Klassengenauigkeit (Meßtechnik) 444
Klassieren 52
Klassierung, trockene 53
Klassifizierung 302
Kleben (Holz) 244
— (Ledert.) 714, 716
— (Metall) 289
— (Plaste) 196
— (Textilt.) 698
Kleber 516
Klebe|binden 657
—bindemaschine 657, 658
—verbindung 530
—zwicken 715
Klebstoff 184, 508
Klebstreifengeber 669
Klein|eisen 572
—kläranlage 556
—last-Härtemeßverfahren 467
—pflastersteine 569
—rundstrickmaschine 685
—spannung 362
—transporter Tafel 63
Klemmverbindung 306
Kletter|bahn 592
—schalung 528f.
Klima|anlage 433, 546, 628, Tafel 53
—truhe 546
Klingelanlage 391
Klinker 227
Klopf|festigkeit 86
—wolf 677
Klotoide 565
Klotzbremse 579
Klystron Tafel 44
Knallgaselement 73
Kneten 189
Kneter 207
Knetwerkstoff 105
Knickbiegen 268
Kniehebel|-Fließpreßautomat 262
—pressen 262
Knitterarmausrüstung 692
Knotenblech 531
Knotenpunkt 567
—satz 351
Knüppel 121
—schere 262, 270
— -Strangggußanlage Tafel 12/13
—straße 151
Koagulat 203
Koagulationsmittel 210
Koaxialkabel 395
Kobalt 109, 133
„Kobaltkanone" 439
Kocher (Zellstoff) 253, 254
Koch|gerät 366
—prozeß (Zellstoff) 254
—salz 165
Kode, tetradischer 486, 487
Kodierung 486
Koeffizientenpotentiometer 483
Kohle 75f., 78
Kohle|badeofen 547
—mikrofon 371
Kohlen|dioxidmesser 461
—disulfid 163
—staubfeuerung 88f.
Kohlenwasser|gas 78
—stoff 76
Kohlenwasserstoffe, aromatische 171
—, feste 181
—, ungesättigte kettenförmige 171
—, zyklische 171
Kokereiofen 77
Kokille 120, 147
Kokosfaser 671
Koks 77, 111
—generatorgas 76
Kolben|dampfmaschine 90
—kraftmaschine 90
—längsschieberventil 318
—löten 289
—manometer 457
—pumpe 96f., 316
—triebwerk 621
—verdichter 99
— -Zahntrieb-Motor 317
Kollationieren 657
Kollektor (Transistor) 399
— (Baut.) 553
Kollodiumwolle 185
Kollimator 424
Kollisionsradar 385
Kolposkop 433
KOM 593
Kombiwagen 594
Kommandoeinheit 639
Kompaß 629
Kompensationsmethode 443
Kompensator 449
Kompositionsfirnis 184
Kompressionskältemaschine 101
Kompressor 98
Kondensationskraftwerk 61, 64
Kondensator (Elektrot.) 353, 393
— (Energiet.) 95f.
—feldmethode (Medizint.) 438
—keramik 229
—lampe 368
—mikrofon 389
—motor 358
Kondensatrückgewinnung 96
Konditionierung 249
Konduktometrie 461
Konfektionieren 210
Konkavspiegel 418
Konservierung (Häute u. Felle) 703
Konstantpumpe 315
Konstruktionsmaß 501
Kontakt 361
Kontakt|raster 643f.
—schleifen 282
—verfahren 162
Kontinue|-Anlage 691
— Bleichanlage 690
Kontroll|element (Polygrafie) 650
—waage 669
Konvektor 544
Konvektionstrocknungsmaschine 692
Konverter (Metallurgie) 116, Tafel 12/13
— (Rechent.) 494
— (Textilt.) 679
—verfahren 116
Konvexspiegel 418
Konzentrations|messung 461
—schmelzen 125
Koordinaten|bohrmaschine 280
—schalter 373, Tafel 43
Köperbindung 681
Kopf|band 517
—blockverhieb 27
Kopier|drehmaschine 279
—steuerung 303
Kopolymerisation 173
Koppel|einrichtung 498
—navigation 610
—trieb 311
Kopplungs|adapter 637
—rendezvous 637
—stutzen 641
Korbverseilmaschine 680
Kordeln 266
Körnen 266
Kornverteilungsstufe 509
Korona|scheider 56
—verluste 362
Korrekturverfahren (Fotografie) 644
Korrosion, elektrochemische 296
—, chemische 296
Korrosionsschutz 296f., 530
—fett 297
—öl 297
Korund 224
Kosmoljot 641
Kracken 87
Krackprozeß 172
Kraftfahrzeuge 592ff.
Kraftfahrzeug|antrieb 594
—ausrüstung 601
—technik 592ff.
Kraft|gesetz 350
—maschinen 87, 90, 94
—meßdose 455
—omnibus 593
—rad 593
—stoff 84ff.
—werk 61, Tafel 5
—werk, geothermisches 74
—werksturbine 94
Kran 338
—hubschrauber Tafel 66
Krätze 126
Kratzfestigkeit 189
Kreisel|kipper 347, 588, Tafel 39
—kompaß 629
—pumpe 98
Kreiselrad|pumpe 98
—verdichter 100
Kreiselverdichter 100, Tafel 10
Kreis|förderer 327, 592, Tafel 40
—kolbenmaschine 90

Kreiskolbenmotor 92
Kreis|lauf, offener 63
–prozeß 62
–säge 281
Krempelmaschine 675
Krempziegel 536
Kreuz|feldmeßwerk 447
–kopfmotor 605
–linienraster 643
–schleifentrieb 311
–spulmeßwerk 447
Kreuzung 574
Kreuz|verband 520
–zeigerinstrument 386
Kriechen 522
Kristallmikrofon 390
kritische Stabstellung 68
Kroll-Betterton-Verfahren 128
Krone (Uhr) 407
Krummschäftigkeit 240
Krumpfechtausrüstung 692
Kübel 336
Kugel|graphit 108
–kopf 412, Tafel 50
–libelle 628
–perimeter 432
–schaufel 347
Kühlen (Glas) 234
Kühl|mittel 291
–schiff 609
–sole 102
–system 63
–transport 102
–turm 96, Tafel 56
Kühlung 100, 103
Kühl|wagen 103, 582
–zug 582
Kulier|gestricke 684
–gewirke 684
Kümo 608
Kunst|druckpapier 259
–fasern auf Zellulosebasis 177
–foliekondensator 393
–gas 75
künstliche Niere 434
künstlicher Horizont 627
künstliches Herz 434
Kunst|seide 177
Kunststoff 172
–, teilsynthetischer 174
–, vollsynthetischer 174
Küpenfarbstoff 183
Kupfer 110, 127
–erz-Tagebau Tafel 4
– -Nickel-Feinstein 129
–seide 178
–stich 653
Kupolofen 143
Kuppel 517
Kuppeln 524
Kuppelschleuse 559
Kupplung 308, 323, 599
Kupplungsautomat 599
Kurbel|-Abkantpresse 262
–pressen 262
–trieb 311
Kürschnerei 707
Kursfunkfeuer 382
Kurz|bogenlampe 368
–hubhonen 282
Kurzschluß 351
– -Käfigläufer 357
Kurz|spinnverfahren 678
–streckenflugzeug 618
–tunnelofen Tafel 21
–wellentherapiegerät 437
–zeichen 177
Kurzzeit|betrieb 366
–wecker 409
Küsten|motorschiff 608
–schutzwerke 560
Kutter 609
Kybernetik 472

L

Labor|automat 440
–meßtechnik 442
–strecke Tafel 48
–technik, medizinische 439
Lack|filmkondensator 393
Lackieren 198, 244
Lade|ausrüstung 604
–baum 340
–einheit 587, 668
–fähigkeit 607
–geschirr 604
–marke 607
–maschine 346
Laden (Bergbau) 24, 38
Lader 347, 588, Tafel 40
Laderaum 602
–querschnitte 608
Lagenholz 245f.
Lageregelung, aktive 636
–, passive 636
Lageregelungstriebwerk 636
Lagern 58
Lager|sichtbehälter 335
–stätte 12
Lagerstätten|behandlung 46
–parameter 43
–typ 41
Lagerung 307
Laktamen 178
Lamellen|bremse 309
–graphit 108
Laminieren 692
Lande|fähre Tafel 68/69
–hilfe 624
–hilfsmittel 637
–kurssender 386
Landstraße 565f.
Langdrehen 277
Längen 268
Längen|messer 453
–meßmaschine 453
Langsamfilter 552
Längsfuge 570
Langsieb|maschine 249
–papiermaschine 256, Tafel 26/27
Längspressen 290
Lang|stabisolator 363, Tafel 21
–streckenflugzeug 618
Längswalzen 148, 266
Laparoskop 433
Läppen 282f.
Läppmittel 283
Laryngoskop 433
Lasche 322
Laser 429ff.
–bearbeitung 284
– -Glas 236
–schweißen 288
–strahlätzung 405
„LASH“ 608, 615
Last|aufnahmemittel 334
–haken 335
–kraftwagen 593
Latex 183, 203
Laufbildwerfer 428
Läufer (Rotor) 92
– (Schiffst.) 604
–verband 520
–wicklung 356
Lauf|feldröhren 397
–gitter 92
–katze 337
–kraftwerk 71
–kran 338
–rad 98, 322
–wasserkraftwerk 578
–zeitröhre 397
–zielbremsung 586
Laugen 36
–regeneration 254
Laugeverfahren 57
Laurinsäure 179
Läutern 707, 717
Laut|sprecher 390
–stärkepegel 719
Lawinenlaufzeit-(Impatt-)diode 399
LDAC-Verfahren 117
LD-Verfahren 117
Lebedew-Verfahren 177
Leclancheelement 73
Leder 702
–bekleidung 716
–faserwerkstoff 712
–pflege 717
–technik 702ff., Tafeln 79/80
–trocknung 705
–waren 716
Leerlauf 351
Lefa 712
Legeverfahren (Textilt.) 695
Legierung 104
Legierungstransistor 399
Lehren 442
Lehrenbohrmaschine 280
Lehrgerüst 518
Leicht|benzin 85f.
–beton 506
Leichtertransportschiff 608
Leichtmetall 124, 131, 506
–bau 535
Leichttriebwagen 579
Leim, pflanzlicher 184
–, synthetischer 184
–tierischer 184
Leimen (Papier) 256
Leinwandbindung 681
Leistung, elektrische 354
Leistungs|faktor 354
–messer 451
Leiter 348
–bahn 402
–gerüst 518

Leit|gitter 92
–schaufel 92
–schiene 590
–schienenbahn 589
–streifen 566
–werk 558, 625
Leitungs|bauelement 396
–profil 554
–resonator 396
Leitungsschutz|schalter 361, 362
–sicherung 361
Leitungstrommel 334
Lenkhilfe 599
Lenkung 598f.
–, adaptive 633
Leonard|satz 364
– -Schaltung 343
Lepolrost 219
Lese-Schreib-Speicher 489, 490
Letter 646
–setdruck 651
Leucht|diode 399
–feuer 611
Leuchtstoff|lampe 368
–röhre 367
Leucht|tonne 611
–turm 611
Lichtbogen|ofen 119, Tafel 12/13
–schweißen, elektrisches 285
–schweißen, offenes 285
Lichtdruck 653
–form 649
Licht|leiter 369
–pausverfahren 654
–punktabtaster 377
–raumprofil 567
–rufanlage 391
–satz 646
–schranke 392
–setzmaschine 646, Tafel 71
–strahloszillograf 450
–tonverfahren 390, 428
–zeigerlot 458
Lickern 705
Lieferwagen 594
Liegende (Bergbau) 24
Lift 341
– -Slab-Verfahren 530
Lignin 241
Linear|antenne 388
–beschleuniger (Medizint.) 439, Tafel 48
–motor 359, Tafel 52
Linien|führung 557, 565
–kipplager 532
–schiffahrt 612
–schreiber 450
Linolsäure 179
Linse 418
Linsensystem 425
Linters 670
Lisseuse 678
Lithium 135
Litzenseil 321
LKW 593
LNG 81, 609
Lochband|ableser 416
–ausgabegerät Tafel 50
–eingabegerät Tafel 50
Lochband|gerät 416
–stanzer 416
–technik 415f.
Loch|bildung 155
–blende 425
Locher 415
Lochkarten|maschine 415
–prüfer 415
–stanzer 415
–technik 414f.
Lochmaskenröhre 398
Löffelbagger 26, Tafel 38
Logikeinheit 491
Logger 609
Loran 384
Lösch|ausrüstung 604
–brause 547
–brücke 561
Lösen (Bergbau) 24, 29, 35
Löseverfahren 57
Lösung, wäßrige 291
Lösungs|gasölverhältnis 42
–mittel 183
–mittelveredlung 693
–polymerisation 173
Lote 289
Löten 288
Löt|verfahren 289
–werkzeug 289
LPG 609
LSI 405
Luft|durchlässe 545
–dusche 545
Lüfteraggregat 545
Luftfahrttechnik 617ff.
Luftfahrzeug 617
– (Systematik) 618
–antrieb 620
Luft|fallhammer 263
–gas 78
–hebeverfahren 49
–heizung 543
–kalk 216
Luftkissen|förderer 330
–förderung 656
–schiff 615, Tafel 64
Luft|kühlung 594
–porenbildner 505
–schiff 620
–schleieranlage 545
–schraube 621
–speicherverfahren 91
–spule 394
–spülung 17
–straße 630
Lüftung, erzwungene 544
–, freie 544
Lüftungsanlage 544f.
Luftverkehr 629
Luftverkehrs|vorschrift 630
–weg 630
Luftvorwärmer 88
Luken|abdeckung 605
–deckel 605
Lumineszenzdiode 399
„Luna" 638f., Tafel 68/69
lunar roving vehicle 640
„Lunik" 638
„Lunochod" 639
Lupe 421
Lupenbrille 421
Lurgi-Spülgasschwefelofen 76

M

Magazinschleifer 250, 251
Mager|beton 569
–kohle 75
Magnesiastein 227
Magnesit 224
Magnesium 110, 133
Magnet 360
Magnetband|gerät 375
–speicher Tafel 50
–verfahren 390
Magnetfeld 349
magnetinduktives Prüfverfahren 470
magnetische Induktion 349
– Messungen 13
magnetischer Fluß 350
magnetisches Prüfverfahren 469
Magnet|keramik 229
–kompaß 629
Magnetohydrodynamischer Generator 72
Magnet|öl 469
–pulverkupplung 309
Magnetron 397
Magnet|scheidung 55
–schienenbremse 579
–tonverfahren 428
–umformung 269
Mahlanlage 89
Mahlen 256
Mahlgut 213
Majolika 228
Makadamdeckschicht 569
Makromolekül 187
–bildung 172
MALIMO 687
Mali|pol 689
–vlies 688
–watt 688
Mangan 110, 133
–knollen 48
Mangeln 693
Manilafaser 671
Manipulator 500, Tafel 31
Mannesmannverfahren 155
Manometer 456
Manteltransformator 360
„Mariner" 639
Markierungsfeuer 382
Marssonde 639
Maschen|bildung 684
–satz 351
–ware 684
Maschinen|elemente 305ff., Tafeln 35, 36
–fließreihe 302
–formen 146
maschinengestrichen 259
Maschinen|lochkarte 415
–satz 646
–scheren 269
–system 304
–umformer 364
–verkettung 302
Maser 429f.
Maske (Reproduktionst.) 644
Maskentechnik (Elektronik) 404

Mastikation 204
Maßanalyse 464
Massedosierung 667
Maßeinheiten, physikalisch-technische 718
Masse|kabel 363
–kern 350
–leimung 256
Massen|fertigung 302
–gut 321
–plaste 172
–stahl 107
Massewiderstand 393
Massivtreppe 540
Maß|ordnung (Bauwesen) 501
–stab 452
Mast 534
–kran 340, 605
Maßverkörperung 443, 452
Matrize 646
Matrizenscheibe (Lichtsatz) Tafel 71
Mattieren 245
Mauerziegel 226, 520
MBV-Verfahren 299
Mechanisierung 472
medizinische Elektronik 435
Medizintechnik 431ff., Tafeln 48, 49
Meeres|bohrungen 18
–spiegelkanal 612
MHD-Generator 72
Meidinger Scheibe 548
Mehr|badätzung 649
–etagenpresse 248
–fachregelung, digitale 481
–kammerklystron 397
–punktregler 477
–reihenmotor 92
–rollengerüst 152
–schichtfilter 552
–seilförderung 344
–spindelbohrmaschine 280
–stärkenglas 421
–stationsmaschine 303
–strompumpe 316
Mehrstufen|ätzung 648
–bleiche 254
– -Rakete 632
Mehrsystem-Triebfahrzeug 580
Membranpumpe 97
Mergel 216
Mersol 180
Mersolat 180
Merzerisieren 690
Mesatransistor 400
Meß|bereich 444
–brücke 449
–einrichtung 443
Messen 442, 718
Messerfalzprinzip 656, 657
Meßergebnis 442
Messer|kopf 280
–ringzerspaner 247
–schneidmaschine 656
–wellenzerspaner 247
Meß|fehler 444
–fühler 443
–generator 450
–gerät 443
–glied 475
–größe 442
Messing 110
Meßinstrument 443
Meß|lupe 453
–methode 443
–mittel 443
–prinzip 443
–satellit 637
–schraube 452
–technik 442ff., Tafel 51
–uhr 453
–umformer 443, Tafel 51
–verfahren 443
–verstärker 443, 450
–wandler 443, 475
–warte Tafel 54
–werk 445ff.
–wert 442
Metallabscheidung, chemische 300
–, elektrolytische 301
Metall|blattverfahren 654
–dampflampe 368
–deckung 537
–diffusionsverfahren 296
–fäden 674
–feder 306
–gewinnungsverfahren 125
metallische Pulver 138
metallischer Werkstoff 104
Metallisieren 198
Metall|keramik 222
– leichtbau 535
Metallografie 464
Metall|-Papier-(MP-)Kondensator 393
–pikrat 185
–plattieren 300
–spritzen 300
Metallurgie 104, Tafeln 12–15, 86
Metamorphit 504
„Meteor" 638
Methylmethakrylat 175
Metro 589
Microstrip 396
Migration 41
MIG-Schweißen 286
Mikroelektronik 402ff.
Mikrofon 389f.
Mikro|-Hämatokrit-Zentrifuge 440
–meterschraube 452
–prozessor 304, 405ff., 490ff.
Mikroskop 422, Tafel 46
Mikrowellentransistor 400
Millen 706
Mineral|farbe 182
–faser 672
–öl 291
Minimum-Kreisbahngeschwindigkeit 635
Mischbauweise 530
Mischen 58
Mischer, pneumatischer 58
Misch|extruder 208
–keramik 229
–polymerisation 173
–splitt-Aufbereitungsanlage Tafel 60
–strom 352
–vorgang 189
–vorwärmer 64
–walzwerk 207
MISFET 400, 401
Mittel (Bergbau) 20
–benzin 86
–pufferkupplung 578
Mittelpunktleiter 354
Mittelspannungs|netz 362
–werk 362
Mittel|streckenflugzeug 618
–temperaturentgasung 76
MKF-6 12
Mobil|bagger Tafel 67
–drehkran 340
Modalfaserstoffe 672
Modelltechnik 43
Modems 374
Moderator 67
Mofa 592
Mohairwolle 672
Mokick 593
Mole 560
„Möller" 111
Mollier-*h*,*s*-Diagramm 87
„Molnija" 638, Tafel 43
Molybdän 110, 133
Mond|fahrzeug 638
–satellit 639
–sonde 638
Monergole 633
Monitor 378
Mono|block 578
–karbonsäure 179
monolithisch integrierte Schaltung 403
Monozelle 72
Montagestab 523
Montanwachs 181
Mooringwinde 604
Moped 592
Morsetelegrafie 374
Mörtel 214, 505
–sand 505
MOSFET 400, 401
MOS|-Schaltkreis Tafel 45
– -Technik 404
Motor|blockstanzer 415
–fahrrad 592
–güterschiff 614
–segler 619
– -Oktanzahl 86
–rad 593
–roller 593
–schrittstanzer 415
–tankschiff 614
Moulinieren 678
MOZ 86
M+S-Reifen 596
MSR-Technik 472f.
Muffelofen 128f.
Mühlen|anlage Tafel 12/13
–feuerung 89
Müller-Kühne-Verfahren 161
Müll|beseitigungsanlage 549
–deponie 549
–kompostierung 549
–kraftwerk 65
–schluckanlage 549
–verbrennung 201, 549
–vergasung 81, 549
–zerkleinerungsanlage 549
Multiliftgerät Tafel 62
Multiplexkanal 493
Multi|spektralkamera 12, Tafel 47
–vibrator 480

N

Nachordnungsgruppe (Eisenbahnt.) 586
Nachrichten|satellit 638, Tafel 43
–technik 371ff., Tafeln 42, 43, 92
Nachzerfallswärme 66
Nadel|filzmaschine 688
–tonverfahren 390
Nagel 516
Nageln 244
Nagelplatte 516
Nähen 696,715f.
Näherungsschalter 392
Nähmaschine 698, Tafel 79
Nähte (Schuhe) 715
Nahtschweißen 287
Nähwirkmaschine 687
Näpfchen (Tiefdruck) 653
Naß|abscheider 58
–bagger 332, Tafel 38
–dienst 60
–gewinnung (Bergbau) 21
–metallurgie 125
naßmetallurgischer Prozeß 104
Naß|spanbunker 247
–spinnverfahren 177f., 678
–veredlung (Textilt.) 690
–verfahren (Faserplatten) 249
– (Zementherst.) 218f.
Natriumchlorid 165
– -Elektrolyse 168
Natrium|dampflampe 368
–hypochlorit 168
–kreislauf 70
–sulfat 162
–sulfid 163
–sulfit 163
–thiosulfat 163
Natronsalpeter 170
Natur|faserstoff 670
–gas 75
–kautschuk 203
Naturstein 504
–mauerwerk 519
–tagebau 29
Nautophon 611
Navigation 610
Navigationssatellit 638
NC-Maschine 274
Neben|bahn 574
–gestein 20
–schlußmotor 359
–schneide 272
Nettoregistertonnage 607
Netzhautkamera Tafel 49
Netzplan 503
Neutralisation 160
Neutron 67
Neutronenreflektor
New-Jersey-Verfahren 128f.
Nichteisen|metall 124
–metallurgie 104
–werkstoff 105
Nicht|leiter 348
–oxidkeramik 228
Nickel 110,129
– -Akkumulator 73
Niederdruck|gasbehälter 83
–technik 314
Niederdruck|vergasung 78
–vorwärmer 63
Nieder|schachtofen 114
–spannungslampe 368
–spannungsnetz 362
Nieten 289
Niob 110,136
Nitrat 165
Nitrieren 160,295
Nitrierstahl 107
Nitro|glykol 185
–glyzerin 185
–phoska 170
Nitroseverfahren 162
Nitro|verbindung 185f.
–zellulose 185
Nitschelwerk 675
Nordostseekanal 612
Normal 443
–drucktechnik 314
–glühen 294
–spurweite 573
Normblende 458
Notausrüstung 629
Notenstich 649
Novolaktyp 174
n-Paraffine 172
NRT 607
NTSC-Verfahren 379
Nuklearmedizin 438
Nulleiter 354,369
Nullung 369
Nullverfahren 449
„Nylon" 673
Nußkohle 59
Nuten|fräsen 281
– -Schneidpresse 262
–ziehmaschine 277

O

OBC-Carrier 609
Ober|bau 572
–druckhammer 263
Oberflächen|behandlung 541
–härten, thermisches 295
–schutz 298f.
–schutzschicht 571
–umwandlung 296,299
–verdichtung 513
–veredlung (Synthetiks) 711
–vorbehandlung 297
–vorwärmer 64
Oberleitungsomnibus 595
Oberste Bergbehörde 39
Objektiv 425
OBO-Carrier 609
Obus 595
OE-Spinnverfahren 679
Ofenlöten 289
Offenend-Spinnverfahren 679
Off-line-Betrieb 494
Offsetdruck 652
–, kleinformatiger 655
–form 652
–maschine Tafel 72
Ohmscher Widerstand 349,352
Oktanzahl 86
Okular 421,422
Öl 179
Olefine 171
Oleum 162
Öl|farbe 183
–fernleitung 82
–hafen 561
–lack 183
–ofen 543
–transformator 360
„ölverstreckter Kautschuk" 204
Omega 384
On-line-Betrieb 494
Opal|-Glas 237
–lampe 367
Operations|leuchte 432
–mikroskop Tafel 49
–register 489
–tisch 431, Tafel 48
–verstärker 483f.
Opferanoden 297
OP-Saal Tafel 48
Optik 416ff.
Optimeter 453
optische Eigenschaften (Plaste) 189
optisches Gerät 421
– Glas 237
Opto|elektronik 406
–koppler 406
„Orbita" 638
Orbital|einheit 639
–station 641, Tafel 68/69
Orbiter 641
Organisationsprogramm 498
Organopolysiloxane 176
Organsine 678
Orlon 175, 178
Ortbetonbauweise 527
orthotrope Platte 531
Ortpfahl 511
Orts|netzumspannwerk 362
–wand 513
Ortung 381
Osmometer 440
Ostwald-Verfahren 164
Oszillograf 450
Oszillografenröhre 398
Oszillografieren 442
Otoskop 433
Ottomotor 90ff.
Overlay-Technik 400
Oxidkeramik 228
Oxyarc-Verfahren 271
Oxydation 159
Oxyliquite 186

P

Pacemaker 434
Packer 44
Packpapier 661
Palette 335,668
Palettenankerhemmung 408
Palettiermaschine 668
Palmitinsäure 179
PAL-Verfahren 379
Panamakanal 612
Panzerförderer 327
Papierausrüstung 258

Papier|kondensator 393
–maschine 256ff., Tafel 27
Pappe 662
Pappdeckung 536
Paraffine 171,181
Parallel|abbau 22f.
–endmaß 452
–fertigung 503
Parallelisieren 675
Pardunen 534
Parex-Verfahren 172
Parkbahn 635
Parkes-Verfahren 128
Pasettenapparat 166
Paß|feder 306
–stiftsystem 647
Passung 305
Paste 190
Paternoster 343
Patientenüberwachungsanlage 392
Patronensicherung 361
Pech 507
PeCe-Faser 179
Peiler, radioastronomischer 385
Pelletieren 58
Pelletizer 209
Pelton-Turbine 92f.
Pendelbetrieb bei Seilbahnen 591
Pentode 397
Perbunan 175
Perforator 647
Perigäum 635
Peripheralradpumpe 98
Peripherie, erste 493,496
–, zweite 494,496
–, dritte 494
–geräte 493
Perlon 178
Perlpolymerisation 173
Permanentmagnet 350
Permeabilität 42,350
Peroxide 168
Personen|kraftwagen 593
–rufanlage 391
Petrolchemie 171
Petroleum 86
Pfahlgründung 511
Pfannen|standentgasung 122
–ziegel 536
Pfeilerstaumauer 562
Pfettendach 517
Pflanzenfaser 670
Phasen|anschnittsteuerung 364f.
–kontrastmikroskop 423
–schiebung 354
–winkel 352
–zustand 42
Phenol-Formaldehyd-Verbindung 174
Phenoplaste 174
pH-Meßzelle 462
Phosphat|dünger 169
–glas 230
Phosphatieren 169,299
Phosphor 169
–dünger 170
Phosphorit 169
Phosphor|säure 169
–verbindung 169
Phthalsäureallylester 175
pH-Wert 160
– -Messung 462
physiologische Unbedenklichkeit 199
Piaphoskan 170
Pick-up-System 257
Pier 561
piezoelektrischer Effekt 74
piezoelektrisches Bauelement 395,
– Manometer 457
Piezokeramik 229
Pigmente 182,709
Pigmentpapier 648
Pikrinsäure 185
Pilottonverfahren 375
Pilzdecke 524
PIN-Diode 399
„Pioneer" 639
PIO-Schaltkreis 493
PKW 593
– (Klasseneinteilung) 593
Planar|diode 399
–transistor 400,404
Plandrehen 277f.
Planetensonde 638f.
Planierraupe 594
Plansortierer 251
Plasma 70
–bearbeitung 284
– -Elektronenstrahl-Schmelzofen Tafel 12/13
–ofen 122
–schneiden 271
–schweißen 286, Tafeln 33, 42
Plast|abfall 190
–beton 505
–buchdecke 659
Plaste 172, 174, 187ff., 508
Plast|einsatz 199
–formmasse 187
–presse Tafel 36
–tauchmasse 297
–werkstoff 187
–zementbeton 505
Plateauaufschluß 22
Platforminganlage Tafel 6
Platin 130
Platine Tafel 45
Platinenscheren 262
Platte (Plaste) 191f.
– (Baut.) 523
Platten|balken 524
–bauweise 529, Tafel 55
–federmanometer 456
–hubverfahren 530
–kondensator 353
–werk Tafel 55
–ziegel 536
Plumbikon 379
Plüschen 706
Pneumostatik, Gesetzmäßigkeit 314
pn-Übergang 349
Polarisation 420
Polarisationsmikroskop 423
Polarisator 420
Polen 126
Polieren 235
–, elektrolytisches 284
Polizeimelder 391
Polrad 357
Polstergründung 513
Poly|addition 173
–acrylat 176
Polyakrylnitril 175
–faser 178
–faserstoff 673
Polyakrylsäureester 176
Polyamid 176,190
–faser 178
–faserstoff 673
Polyäthylen 176,190
–faser 178
–glykolterephthalat 178, 190
Polybutadienkautschuk (BK) 204
Polyester 175
–beton 175
–faser 178
–faserstoff 673
Polygrafische Technik 642ff., Tafeln 70–74
Poly|glykoläther 180
–isoprenkautschuk (IK) 204
–kondensation 173
–merisation 173
Polymerisations|grad 173
–synthesen 87
Polyolefinfaserstoff 674
Polypropylen 176,190
–fasern 178
Poly|styrol 176
–tetrafluoräthylen 176
Polyurethan 176,708
–faser 179
–faserstoff 674
Polyvinylalkohol 175
–faser 179
–faserstoff 673
Polyvinyl|azetat 175
–chlorid 175, 190, 708
Poop 603
Porenbeton 506
Portal|hubwagen Tafel 40
–kran 339, Tafeln 37, 55, 62
Portlandzement 217
Porzellan 228
Porosierungsmittel 709
Porosität 42
Positioniersteuerung 500
Potentiometer 353
–verfahren 449
Pottasche 167
Präge|metallplattendruck 654
–richten 266
Prall|blech 463
–brecher 51
–mühle 51
Prelana 175
Presse 225, 261f., Tafeln 14/15, 29
Pressen (Elaste) 208
– (Glas) 232
– (Ledert.) 692
– (Metallurgie) 106
– (Plaste) 192
– (Pulvermetallurgie) 139
Pressen|partie 257
–schleifer 250
Preß|formung 208
–stumpfschweißen 196
–vollholz 243
Preventer 17
Primär|energieträger 61
–radar 384

Prioritätssteuerung 496
Prisma 418
Prismenspektrograf 464
Produkten|fahrt 343
–tanker 609
Produktions|prinzip 502
–rohrtour 44
Profil|-Querwalzen 264,266
–schere 270
–schleifverfahren 282
–stahl 107
–straße 151
–walzmaschine 264
–ziehverfahren 192
Programm 488,492
–bibliothek 495
–geber 480
Programmier|feld 484
–sprache 494
Programmierung 484,494
Programmsteuerung 480
Projektionsgerät 428
Projizierdrückwalzen 266
Propeller 606
–turbinen-Luftstrahltriebwerk 622f.
prompt kritischer Zustand 68
Proteinfaser 178
Protektor 17
Prothese 433
„Proton" 637
Prozeß 473
–, technologischer 260
Prozessor 488
Prozeß|rechentechnik 496ff.
–rechner 496
Prüfen 442
Prüf|technik 464ff., Tafel 51
–transformator 360
–verfahren, zerstörungsfreie 467ff.
Pseudotetrade 487
Psychrometer 460
PTL 622f.
Puffer 578
–lösung 160
–speicher 493
Pulpe 712
Pulver|herstellung 138
–metallurgie 104,138, Tafel 15
pulvermetallurgischer Werkstoff 142
Pulver|schmieden 140
–schneidbrennen 270
Pumpbeton Tafel 56
Pumpe 96f.,315, Tafel 8/9
Pumpen|apparatur 98
–umlaufkühlung 594
Pump|frequenz 429
–speicherkraftwerk Tafel 8/9
–speicherwerk 71f.
Pumpstation 82
Punkt|kipplager 532
–schreiber 450
–schweißautomat Tafel 33
–schweißen 287
–steuerung 500
PUR 708
Putz 540
Putzerei 676
Puzzolanzement 217
PVC 175, 190, 708

Pylon Tafel 57
Pyrolyseprodukt 213
Pyrometallurgie 125
pyrometallurgischer Prozeß 104
Pyrometer 460
–kegel 226
Pyrotechnik 185

Q

Quadermauerwerk 519
Quadrantruderanlage 603
Quadrofonie 375
Qualitätsstahl 107
Quantisierung 371
Quarto|gerüst 150
–rollengerüst 152
Quarz 223
–filter 395
–glas 230
–oszillator 395,410
–sand 223
–uhr 410
Quecksilber 110,130
–barometer 456
–dampflampe 368
–-Hochdrucklampe 368
–verfahren 167
Quelle 400
Quellen 522
Quer|fuge 570
–glattwalzen 266
–pressen 290
–ruder 625
–schnittsgestaltung von Straßen 566
–schotte 602
–spritzkopf 209
–stapellauf Tafel 65
–strahlruder 603
–verband 533
–walzen 264,266
Querwalz|maschine 264
–verfahren 149
Quotientenmeßwerk 447

R

Rad 596
Radar 384ff.
–bake 611
–bildröhre 398
Radaufhängung 597
Räderwerk (Uhr) 408
Radial|bohrmaschine 280
–kolbenpumpe 316
–lager 307
–lüfter 545
–reifen 596
Radiator 544
Radierung 653
radioaktive Abfälle 70
Radiologie 438
Radio|nuklidbatterie 74
–-Sextant 384,385
Radsatz 578

Rad|scheibenwalzwerk 156
–schlepper 594
Raffination 85
Raffinations|elektrolyse 126
–verfahren 104,126
Rähm 517
Rahmen 524
–antenne 388
–brücke 534
–richtwaage 453
Rakeltiefdruck 653
Raketen|antrieb 631ff.
–grundgleichung 631
–lenkung 633
–steuerung 633
–technik 630ff.
Raketentreibstoff, fester 633
–, flüssiger 633
Raketentriebwerk 631f., Tafel 95
RAM 405,489f.
Ramie 671
Rampe 24
Ramsdensches Okular 421f.
Rändeln 266
Rand|härten 295
–streifen 566
Rangier|abteilung 585
–dienst 585
–technik 585
Raster|aufnahme 643
–elektronenmikroskop 465
–maß 501
–mikroskop 422,423
Rauch|gas 88
–meldeanlage 392
–ware 702
Rauchwaren|pflege 717
–veredlung 707
–zurichtung 706
Rauhen 692
Raum|abstand 584
–anzug 640
–basis 641
–elemente im Tagebau 23
Räumen 276
Raumfahrt|keramik 229
–technik 630, Tafeln 68,69,96
Raum|filmverfahren 429
–flugkörper 634ff.
–gleiter Tafel 68/69
Räumnadel 276
Raum|schutzanlage 392
–sonde 633
–station 640
Räumte 607
Raum|teilung 372
–transporter 641
–welle 356
–zellenbauweise 529
Raupen|drehkran 340, Tafel 37
–fahrwerk 324
Reaktion, chemische 159
Reaktions|anstrichstoff 183
–klebstoff 196
–turbine 92
Reaktivfarbstoff 183
Reaktivität 67
Reaktor 67ff.
–keramik 229
–leistung 68
–steuerung 67
Real-time-Betrieb 496

Rechenautomat, analoger 483ff.
–hybrider 485
Rechen|funktionseinheit 483
–gerät 413
–maschine 413
–technik 483ff.
– - und Datenverarbeitungstechnik 483ff., Tafeln 50, 88, 89
–werk 488, 490
Rechner 483ff.
Rechteckflügel 624
Rechte-Hand-Regel 350
Recken 197,265
Reckmaschine (Ledert.) Tafel 80
Redler 328
Redox-Vorgang 159
Reduktion 125,159
Reduktionsmaßstab 452
Reduzieren 267
Refiner|-Holzstoff 252
– -Verfahren 251
Reflektor 424
Reflexionsgesetz 417
Reflex|klystron 397
–kopie 654
Reformieren 87
Reforming-Verfahren 172
Refraktometer 462
Refraktor 424
Regalbedienungsgerät Tafel 40
Regel|abweichung 475
–fahrzeug 583
–faktor 475
–größe 475
–güte 475
–kreis 474ff.
Regeln 474
Regel|spurweite 573
–system Tafel 52
Regelung 475
–, digitale 481
Regelungsarten 476
Regeneratoren 96
Regen|fallrohr 537
–wand 547
Register 489f.
Registrieren 442
Registrierkasse 413
Regler 57, 475ff.
–schalter 361
Reiben 279
Reibgesperr 309
Reibrad|-Spindelpresse 261f.
–trieb 310
Reibungsschweißen 197, 288
Reichgas 76
Reifen 596
–wächter 601
Reihen|fertigung 503
–kolbenpumpe 317
–schlußmotor 359
Reinstsilizium 136
Reisecharter 612
Reise-, Sport- und Arbeitsflugzeuge 618
Reiß|span 271
–wolf 677
Reizströme 437
Rektifikation 159
Rektifikator 101
Rektoskop 433
Rekultivierung 30
Rekuperator 96
Relais 361
–stelle 376
Relativ-Querneigungsmesser 628
Rendezvoustechnik 637
Reproduktionskamera Tafel 70
Research-Oktanzahl 86
Resoltyp 175
Resonanzverfahren 469
Rest|seitenbandverfahren 380
–wärme 66
Rettungs|ausrüstung 604
–boot 604
Revolver|drehmaschine 278
– -Schneidpresse 262
Reusenantenne 388
Rezepturgestaltung (Kautschuk) 206
RGW-Standard 722
Rhenium 136
Richt|antenne Tafel 43
–bohrung 19
–charakteristik 388
Richten 264
Richtfunk 376, 379
–turm 376
–verbindung 387
Richtschacht 33
Richtungsgruppe 586
Richtwaage 453
Riegel 519
Riemchenstreckwerk 677
Riemen|fallhammer 263
–trieb Tafel 42
Riesenimpulslaser 430
Ring|beschleuniger (Medizint.) 439
–feder 578
–kernspeicherelement 395
–ofen 227
–spinnmaschine 677
–wadenfischerei 610
–walzwerk 157
Rinne 55
Rippendecke 524
Riser 19
Robotron Tafel 50
Rockwellverfahren 467
Roh|benzin 86
–dichte 241
Roheisen 104, 111, 114
– -Erz-Verfahren 118
–erzeugung 104
–gewinnung 111
–sorte 114
Roh|kohle 75
–öldestillation 85f., Tafel 16/17
Rohr|biegemaschine 264
–brunnen 514
–bündel-Wärmeübertrager Tafel 34
Röhren|libelle 453
–ofen 85
Rohrentlüfter 553
Röhrentrockner 60
Rohr|federmanometer 456
–fernleitung 82f.
–formstück 313
–heizkörper 544
–herstellung 154
–leitung 312, Tafel 10
–postanlage 330
Rohr|stahl 107
–straße 151
–verbindung 312
–ziehen 267
Roh|stoffe, mineralische 11
–zinn 129
Roll|biegen 268
–bock 573
Rolle 323
Rollen 298
–bohrwerkzeug 38
–entwicklungsgerät 643
–falzprinzip 656f.
–kalander 259
–presse 244
–schneidmaschine 258
Roll|förderer 329
–gang 150,329
–meißel 15
– -on-Roll-off-Schiff 608
–wagen 573
ROM 405,489
Röntgen|aufnahmegerät 438
–diagnostik 438
–durchleuchtungsgerät 438
–fluoreszenzanalyse 462
–schutzglas 236
–strahlung 468
–therapiegerät 439
Ro-Ro-Schiff 608, Tafel 65
Rösten (Erz) 104,125
Rost|feuerung 88
–platte 511
Röstreaktionsarbeit 125
Rotarybohren 14
Rotations|brenner 89
–form (Plaste) 193
Rotationskolben|maschine 90
–motor 92
Rotations|motor 317
–schablonendruckmaschine 691
–schale 525
Rotor 92, Tafel 42
Rotschlamm 131
Rouleauxdruckmaschine 691
ROZ 86
RTL 405
Rubidium 136
Rubinlaser 430
Rückführungstechnik 637
Rückkehr|einheit 639
–stufe Tafel 68/69
Rück|prallelastizität 202
–schlagventil 319
–stoßprinzip 631
–wärtswellenröhre 397
Ruder|anlage 603
–art 603
–maschine 603
–steuerung, hydraulische 628
Rührwerk 190
Rumpfwerk 625
Runden (Buchblock) 658
Rund|funktechnik 386f.
–holz 507
–kipper 588
–kneten 265
–sichtradar 384, 385
–sieb 257

Rundsieb|former 258
—maschine 257
Rund|sortierer 252
—stahlkette 321
—strickmaschine 685f.
—tischautomat 303
Runzelkorn 653
Rupfen 707
Ruß 205
Rutsche 330
Rütteldruckverfahren 513

S

Sack 665
Sägen 280f.
Saldiermaschine 413
Salpetersäure 164
—ester 185
Saljut 640, Tafeln 68/69, 96
Salzen 704
Salz|gesteinaufbereitung 59
—kaverne 84
—lakenkonservierung 704
—säure 168
— -Siedepfanne 166
—stockfalle 41
Sämischgerbung 705
Sammler 57
Sammel|heizung 543
—linse 419
—schiene 362
Sand 505
—aufbereitung 59
—fang 555
Sandwich-Element 199
Sanitärraumzelle Tafel 58
Satelliten-Navigationssystem 383
Satinieren 259
Sattdampf 87f.
Sattel|schlepper 345
—zug 593
Saturn Tafel 68/69
Satzfräser 280
Sauberkeitsschicht 570
Saug|gerät 435
—lüftung 544
—zug 62
Sauerstoffaufblas|konverter 117
— -Stahl 107
—verfahren 117
Sauerstoff|hobeln 270
—therapiegerät 434
—trennen, elektrisches 271
Säuerungsmaßnahme 46
S-Bahn 588
Scanner 644, Tafel 70
Scatter-Richtfunkverbindung 387
Schaben 275
Schablonendeckung 536
Schacht 33
—abteufen 36
—brunnen 551
Schachtel 662
Schacht|förderanlage 343
—förderung 36
—lüftung 545
Schachtvorwärmer 219
Schaftfräser 280
Schafwolle 671
Schake 322
Schäkel 335
Schale 517,525
Schall|dämmstoff 508
—speicherung 390
Schälfurnier 246
Schalt|anlage 362
—bild 351
Schalter 361
Schalt|folgediagramm 480
—gerät 361
—hilfe 600
—kreis, integrierter 403ff., Tafel 44
—kupplung 308
Schaltung, hybridintegrierte 402
Schalt|werk 309
—zeichen 351
Schalung 528
Schamottestein 227
Schappe 14
Schappespinnerei 678
Schären 682
Schärfen 714
Scharfenberg-Kupplung 579
Schaufellader, Tafel 40
Schaufelrad 347,606
—absetzer 333
—bagger 26f., 332, Tafel 2
Schaumbeton 506
Schäumer 57
Schaum|flotation 57
—glas 235
Schäummaschine Tafel 18
Scheibe 523
Scheiben|bremse 309,323,579
—fräser 280
—kupplung 308
—lochapparat 155
—mühle 251,256
Schein|fuge 570
—leistung 354
Scheitel|brechkraft 421
—kanal 617
Schenkelpolsynchronmaschine 357
Scheren 692
Scher|span 271
—stock 605
Scherenstromabnehmer 580
Scheuerprüfung 701
Schicht|aufnahmegerät 438
—holz 246
—lagerstätte 20
—mauerwerk 519
—stoffe, textile 689
—träger (Synthetiks) 709
—widerstand 353, 393
Schieber 313
Schiebewiderstand 353,393
Schiene 322, 572f.
Schienen|befestigung 573
—fahrwerk 324
—profil 323
—wagen 582
Schießbaumwolle 185
Schiffahrtskanal 558
Schiffbarkeit 616
Schiffs|antrieb 605
—ausrüstung 603
—größe 606
—hebewerke 559ff.
—klasseattest 607
—klassifikation 607
—körper 602
—schleuse 559, Tafel 59
—schraube 606
—technik 602ff.
—vermessung 606
Schirmgitter 397
Schlackeabführung 62
Schlägermühlenfeuerung 89
Schlag|maschine 674
—schere 197
—wolf 677
—zahnfräser 281
Schlammbehandlung 556
Schleif|band 282
—drahtmeßbrücke 449
Schleifen 234, 281f.
Schleiferarten 250
Schleif|körper 281
—maschine 282, Tafeln 31–33
—scheibe 228
Schleppbetrieb 613
Schlepper (Fördert.) 345
—(Schiffahrt) 610, 613
Schlepp|förderer 328
—kahn 613
—kettenförderer 328
—netz 609
Schleuder|förderer 329
—guß 144, 192f., 290
Schleudern 232
Schleusen|kammer 559
—kanal 612
—treppe 559
—Schlichten 265, 682
Schlicker, keramischer 224
—gießen 139
Schliff, metallografischer 465
Schlitzen 244
Schlitz|strahler 389
—type 412
—verschluß 425f.
—wand 514, 563
Schloß, elektronisches 392
Schlupf 358
Schmalband 152
Schmälzen 677
Schmelzen (Metallurgie) 104
—(Silikatt.) 214,230
Schmelz|feuerung 89
—flußelektrolyse 131ff.
—ofen (Glas) Tafel 23
—sicherung 361
—spinnverfahren 178
—tauchverfahren 299
—zement 214
Schmiedemaschine 262, Tafel 29
Schmieden 106
Schmieren (Ledert.) 705
Schmier|fett 181
—mittel 181, 291, 312
—öl 181
Schmierungs|art 312
—technik 311
Schnecken|aufgeber 330
—förderer 328
—kolben 193

Schnecken|lader 346, 588
–lenkung 599
–presse 190
–trieb 310
Schneid|automat 262, 270
–eisen 279
–maschine Tafel 73
Schneiden 197, 234, 269
Schneid|keramik 273
–öl 181
–stoff, oxidkeramischer 273
–werkstoff 273
Schnellarbeitsstahl 107, 273
schneller Brüter 67f., Tafel 8/9
Schnell|filter 552
–mischer 190
–transporter 594
Schnitt|bandkern 395
–bewegung 272
–bildplanung 694
–färben 658
–holz 243ff., 507
–holztrocknung 243
–kraft, spezifische 272
–werkzeug 270
Schnüren 680
Schönheitsschliff 283
Schotter 505
Schräg|aufzug 343
–seilbrücke 534, Tafel 57
–walzen 149, 154f., 266, Tafel 14/15
Schrapper 347
Schraube 515, 530
Schraublehre 452
Schrauben 285, 244
–bremse 587
–feder 597
–federmanometer 456
–pumpe 97, 316
–sicherungselement 306
–verdichter 99
–winde 336
Schreib|automat 412
–kopf 412
–maschine 411
–projektor 428
–satz 647
Schreit|bagger 332
–werk 324
Schrittmotor 500
Schrott 115
Schrumpf|einrichtung 669
–folie 664
–folienverpackungsmaschine Tafel 76
–verbindung 305
Schruppdrehen 273
Schub 621
–aufgeber 330
–betrieb 614
–erzeugung 621
–karre 346
Schubkurbel|-Mechanismus 45
–trieb 311
Schub|prahm 614f.
–schiff 614
–schlepper 615
Schubstangen|aufgeber 330
–förderer 328
Schub|vektorregelung 633
–verband 613
–wandler 622
Schuhe 712ff.
Schuh|größen 712
–längenmaß 713
Schukosteckdose 369
Schuppendeckung 536
Schürf|arbeiten 13
–bohrgerät 16
Schürfen 16
Schürf|graben 20
–grube 509
–kübelbagger 331
–schacht 20
–stollen 20
Schurre 330
Schuß 681
–perforation 44
–wehr 561
Schüttelrutsche 328
Schüttgut 321, 661
–frachter 609
Schüttung 513, 515
Schutzanode 297
Schütz 361
Schutz|einrichtung 361
Schutzgas|kontakt 373
–lichtbogenschweißen 286
–lötung 289
Schutz|gerät 361
–gerüst 518
–isolierung 369
Schwach|gas 76
–feldscheider 55
Schwallöten 289
Schwarz|blech 663
–deckenfertiger Tafel 60
–kupfer 127
–pulver 185f.
Schwebe|bahn 589, 591
–körperverfahren 458
–säule 516
Schwefel 160
–dioxid 161
–kolloid 18
–kontaktdose 369
–farbstoff 182
–kohlenstoff 163
–säure 162
–verbindungen 160ff.
–zement 217
Schweifen 265
Schweiß|arten 285
–automat Tafel 34
Schweißen (Fertigungst.) 285
– (Plaste) 196
– (Rohrleitungen) 83
– (Textilt.) 698
Schwelle 572
Schwellenschraube 573
Schwelung 76
Schwenk|abbau 22f.
–armstanze 714, Tafel 79
–flügler 619, 624
–schaufellader 347
Schwer|benzin 86
–beton 505
Schwergewichtsmauer 513
Schwerkraft|abscheider 58
–guß 143
Schwermetall 124
Schwerstange 17
Schwimm|bagger 332
–dock Tafel 65
schwimmender Estrich 538
Schwimmerprinzip 457
Schwimm|greiferbagger Tafel 1
–kasten 512
– -Sink-Sortierung 54
Schwinden (Beton) 521
Schwindung (Holz) 241
Schwing|aufgeber 330
–förderer 328
–herd 55
–kreis 356
–system (Uhr) 409
–turbine 670
Schwingungsdämpfer 597
Schwingziehschleifen 282
Schwöde 704
„Seabee" 608, 615
SECAM-Verfahren 379
Sedimentation 58
Sedimentgestein 504
Seebau 560
Seebeck-Effekt 74
See|buhne 560
–deich 560
–grenze 615
–hafen 612
–kanal 611
–laterne 611
–salz 165
–schiffahrt 607
–wasserstraße 611
–zeichen 610f.
Segelflugzeug 619
Segerkegel 226
Segmentbauweise 633
Seide 672, 674, 678
Seife 179
Seifen (Bergbau) 31
–pulver 180
Seigern 126
Seilbahn 591
Seilen 680
Seil|fahrt 343
–kernrohr 15
–rolle 321
–tragwerk 531
–treidelanlage 592
–trieb 310
–trommel 321, 344
–winde 324, 337
Seiten|baumtraktor Tafel 10
–blockverhieb 27
Seitenkanal 617
–pumpe 98
Seiten|kernschußgerät 16
–kipper 347
–leitwerk 625
–trawler 609
Sektorenfeuer 611
Sekundär|elektronenvervielfacher 462, 463
–material 187
–radar 383
Selbst|block 577
–fahrer 614f.
Selen 136

seltene Metalle 134
Sendeantenne 388
Sender 376
Sendzimir-Verfahren 299
Sengen 690
Senke (Informationst.) 400
Senken 279
Senkerarten 278
Senkkasten 512
Sensor 636
Separator 253
Servolenkung 599
Setz|maschine 54
–stufe 540
–technik 645f.
Setzung 509
Setz|vorgang 645
–waage 453
SEV 463
Shaping-Maschine 274
Shed|dach 525
–halle 532
Sheradisieren 300
SI 718
Sicherheits|armatur 17
–glas 238
–einschluß 70
–kupplung 309
–sprengstoff 186
Sicherung 361
Sicherungs|automat 361
–element 306
Sicken 268
Sieb|anlage 555
–bodenwascher 77
Siebdruck 654
–farbe 184
Sieb|klassierung 52
–partie 257
–trommeltrocknungsmaschine 692
Siede|salz 165
–wasserreaktor 68f.
Siemens-Martin|-Ofen Tafel 12/13
– -(SM-)Verfahren 118
– -Stahl 107
Simultankanal 493
Signal (Informationst.) 370, 473
– (Eisenbahnt.) 576
–, binäres 485
–anlage 391
–arten (Informationst.) 371
–flußbild 473
Sikkative 183
Silanol 177
Silber 130
Silikasteine 227
Silikattechnik 214, Tafeln 21–23
Silikon 176
–harz 177
–kautschuk (SiK) 204
–lack 177
–öl 177
Silitstab 171, 229
Silizium 136
–diode 365
–halogenide 177
Siliziumkarbid 171, 224
–keramik 229
Siliziumtetrachlorid 169, 177
Single-Pull-System 605
Sinkwalze 557f.
Sinter|glocke 141
–hartmetall 273
–korund 229
Sintern (Metallurgie) 58, 104, 125, 141
– (Silikatt.) 214
Sinterwerkstoff 107
Sinuslineal 452
SIO-Schaltkreis 493
Sisal 671
Skalen|teil 444
–wert 444
Skelettbauweise 518, 529
Skilift 592
Skip 344
– -Anlage 37
Skylab 640
smoked sheets 203
SNG 80
Soda 165f.
Söderberg-Elektroden 171
Sofortbildfotografie 427
Software 492, 498
„Sojus" 640, Tafeln 68/69, 96
Solarzelle 399, Tafel 43
Sole 165
Solvay 166
Sonder|bahn 589
–kautschuk 204
–keramik 228
–presse, mechanische 262
–umschmelzverfahren 122
Sonnen|heizung 544
–kraftwerk 73
–teleskop 424
Sorelzement 161, 217
Sorptions|maschine 101
–verfahren 198
Sortier|maschine 415
–prozeß (Rohstoffe) 54
Sortierung (Holzstoff) 251
– im Magnetfeld 55
Source 400
„space-shuttle" 641
Spaltanlage 80, Tafel 6
Spalten 87
Spalt|gas 76, 80
–polmotor 358
–produkt (Kernspaltung) 66
–stoffe, künstliche 66
–vergasung 80
Späne (Holz) 242
Spanen 271ff.
Spänetrocknung 243
Span|formen 271
–formteil 248
Spann|beton 526f.
–dorn 292
–kopf 527
–leichtbeton 527
–stahl 526
–teppich 539
– -Trocknungs-Fixier-Maschine 692
–verfahren (Beton) 526
–zange 292
Spannung 349
Spannungs|armglühen 294ff.
– -Dehnungs-Diagramm 465
Spannungs|induktion 350
–messer 450
–verteilung (Bergbau) 32
–wandler 448
Spanplatten 244ff., Tafeln 24, 25, 85
Spant 602
Spanwinkel 272
Sparbeizen 298
Sparrendach 517
Speicher 405
–, adressierbarer 489
–, externer 493
–einrichtung (Fertigungst.) 293
–elemente (Bergbau) 24
–gestein 42
–kraftwerk 71
–triebwagen, elektrischer 581
Speiser 232
Speisewasservorwärmer 63, 88
Spektralanalyse 464
Sperr|holz 246
–richtung 365
–stoff 508
–ventil 319
Spezial|druckfarbe 184
–schiff 610, 612
–seife 180
–wagen 582
–zement 217
Spezitex-Ausrüstung 692
Siegel (Optik) 417
–glasherstellung 233
–reflexkamera 426
–teleskop 424, Tafel 47
Spill 337
Spindelpumpe 97
Spinndüse Tafel 18
Spinnen 674
Spinnverfahren 676
Spiral|bohrer 14, 278
–seil 321
–trommel 344
Spitzendiode 399
Splitt 505
–streuer 569
Spoiler 625
Spraydose 664
Sprengen 37
Spreng|gelatine 185
–kapselzündung 186
–lochbohrwagen (Tafel 1)
–mischung 186
–nieten 290
–öl 186
–plattieren 300
–salpeter 185
–schweißen 288
–stoff 184ff.
–werk 516
Sprinkleranlage 547
Sprit-Umdruck-Verfahren 655
Spritz|blasen 193
–druck 692
Spritzen 210, 298
Spritz|gießen 193, 209, Tafel 18
–gußverfahren 716
–pressen 194, 209
Sprüh|düsensystem 547
–kautschuk 203
Sprungschanzenüberfall 564
Spule 394
Spulen 682

Spulen|feldmethode (Medizint.) 438
-kern 394
–schützwebmaschine 682
Spülgasverfahren 76
Spülungs|dichte 18
–technik 17
Spunden 244
Spundwand 513
Spur (Lochbandt.) 416
Spurenmetall 134
Spur|kranz 323
–schachtofen 127
–wechsel 573
Stab|ausdehnungsthermometer 459
–bogenbrücke 534
Stabilisator 17, 597, 709
Stabilisierungskolonne 85
Stabilität 475, 603
Stab|mühle 59
–netzwerk 531
–stahlstraße 151
Stadt|gas 76, 79f.
–schnellbahn 588f.
–straße 565f.
Stahl 104, 107, 115, 506
Stahlband 322
–förderer 326
–presse 248
Stahl|bau 530
–beton 522f.
–betonpfahl 511
–brücke 533f.
Stähleschleifmaschine 278
Stahl|gelenkkette 322
–gittermast Tafel 66
–gruppe 107
–guß 108
–hochbau 532
Stahlleicht|bau 535
–beton 525
Stahl|maßstab 452
–pfahl 511
–seilgurt 322
–silikatbeton 525
–skelettbau 532, Tafel 57
–stichdruck 649, 653
–tragwerk Tafel 57
–treppe 540
–verbundkonstruktion 533
–veredlungsmetall 132
Stamm|entrindungsmaschine Tafel 24/25
–gleis 573
Standard-Interface 492f.
Standardisierung 721f., 302
Standard-Unterprogramm 499
Ständer 519
–wand 538
Stand|linie 381
–seilbahn 591, Tafel 39
–zeit (Fertigungst.) 273
Stangen|bewehrung 526
–gerüst 518
–zug 267
Stanzautomat Tafel 75
Stanzen 197
Stapel|kran 338
–platte 335
Stapler 346
Stärkeleim 184
Stark|feldscheider 55
–gas 76
Starrachse 596
Start|fenster 636
–hilfe 624
–stufe 632
Stationsgruppe (Eisenbahnt.) 586
Statoskop 627
Staubewässerung 556
Staub|feuerung 88
–filter 58
Stauchen 265
Stauch|falz 657
–kammerverfahren 679
–maschine 262
Stau|damm 563
–druckmeßgerät 454
–mauer 562, Tafeln 7, 59
–scheibenförderer 328
–stufe 558
–verfahren (Durchflußmessung) 458
Stearinsäure 179
Steatit 229
Steckdose 364
Stecker 364
Stegkettenförderer 327
Steig|förderer 320
–rohrstrang 44
Steilförderer 326
steilstehende Lagerstätte 20
Stein|bau 519
–damm 563
–druck 652
Steine und Erden 503
Stein|-Grobschliff 252
–gut 228
– -Holzschliff 252
–kohle 75ff.
–kohlenkoks 75
–packung 557
–salz 165
–schlag 505
–schüttdamm Tafel 59
–schüttung 557
– -Verfahren (Holzstoff) 250
–wall 560
Stell|antrieb 474, 478
–einrichtung 474, 478, 500
–glied 479
–größe 475
–magnet 360
–motor 634
–schalter 361
–trieb 310
–ventil Tafeln 52, 53
–werk 576
Stempel (Bergbau) Tafel 3
Stereo 650
– -Filmprojektion 429
–fonie 375, 428
Sterilisationsanlage 433
Stern|holz 246
–motor 92
–radpumpe 98
–schaltung 354
Stethoskop 432
Stetig|bahnsteuerung 500
–förderer 325, 588
–schleifer 251, Tafel 26/27
Steuer|anlage 603
–einrichtung 474
Steuern 474ff.
Steuer|schalter 361
–strecke 474
–werk 488
Steuerung, automatische 479
–, digitale 480
–, hydrostatische 313
–, numerische 274, 303, 499f.
–, pneumatische 313
Steuerungs|arten 479
–system 474
– - und Regelungstechnik 473ff.
Stibitz-Kode 487
Stich (Schuhgrößen) 712
– (Textilt.) 696
–kanal 617
–maß 712
Stickstoff|dünger 170
–verbindungen 163
Stiefelverfahren 155
Stiel 517
–strahler 389
Stift 306
–ankerhemmung 408
Stimmgabeluhr 410
Stirn|fräser 280
–kipper 347, 588
–radtrieb 310
–radgetriebe Tafel 35
stochastisch 371
Stöcke (Bergbau) 31
Stoff (Textilt.) 680
–aufbereitung (Papiert.) 255
–auflauf 256
–eigenschaftsändern 260, 293
–feder 307
–leichtbau 581
–löser 254f.
Stollen 33
Stopfenzug 267
Stopper 409
Stoppzylinder|-Automat Tafel 72
–maschine 651
Stör|größe 474
–größenaufschaltung 476
–klappe 625
–stellenhalbleiter 349
–übergangsfunktion 475
Stoß|bankverfahren 155
–dämpfer 597
Stoßen 274
Stoß|ionisation 367
–läppen 283
–maschine 274
–schaufel 347
–teerscheider 77
–vorrichtung 578
Strahlen|abschirmwand 70
–gatter 392
–optik 416ff.
–schutz 70
–schutzbrille 421
–therapie 438
Strahl|läppen 283
–pumpe 98
–triebwerk 622f.
–turbine 623
Strahlungs|beständigkeit 189
– -Dampferzeuger 89

Strahlungs|detektor 463
—heizung 544
—ofen 542
—vernetzung 198
Strainer 209
Strang|guß 121, 143
—pressen 140, 157f., 192, 248, 267
Straße, öffentliche 564
Straßen|bahn 590
—bau 564
—baubitumen 568
—brücke 533
—einlauf 554
—instandhaltung 571
—verkehrstechnik 601
Streb|bau 35
—bruchbau 34
Strecke 33
Strecken (Fertigungst.) 268
— (Textilt.) 675
—band 677
—block 577
—förderung 38
—geschwindigkeit 583
—steuerung 500
—vortrieb 38
Streck|formen 195
—richten 268
—werk 675
Streichen (Oberflächenschutz) 298
— von Papier 259
Streich|garn 677
—rakel 192
—verfahren 192
Streifen|fundament 510
—schere 269
Streustrahl-Richtfunkverbindung 387
ST-RGW 722
Strichbildaufnahme 643
Stringer 602
Strom|begrenzungsventil 319
—dichte 349
—klassierung 53
—kreis 349, 351
—laufplan 361
—messer 450f.
—richter 365
—schubverband Tafel 64
— -Spannungs-Kennlinie 398
—stärke 349
—teilventil 319
—trockner 249
Strömungs|bremse 579
—förderer 329
—getriebe 600
—kraftmaschine 92
—kupplung 309
Strom|verdrängungsläufer 358
—ventil 318
—wandler 448
Strukturschaum 199
Stück|dosierung 667
—färbemaschine 691
Stückgut 320, 661
—frachtschiff 608, Tafel 65
Stück|kalk 216
—kohle 59
Stufen|prinzip 631f.
—sprung 722
Stufen|umformautomat 262
—wascher 77
—widerstandsmeßbrücke 449
Stuhl, liegender 517
—, stehender 517
—säule 517
Stumpfschweißen 287
Sturzwehr 562
Stütze 524
Stütz|mauer 513
—zapfen 308
Styrol 175
— -Butadien-Kautschuk (SBK) 203
Substitution 160
Substrat 402
Sucher 426
Suchmethoden, geologische 12
—, geophysikalische 12
Suchverfahren, bohrtechnisches 14
Suezkanal 612
Sulfat|verfahren 253
—zellstoff 253
Sulfit|ablauge 253
—zellstoff 252
Sulfochlorierung 180
Sulfoxydation 180
Super 376
—finishen 282
— -Orthikon 377
—phosphat 170
Supraleitung 361
„Surveyor" 638
Suspensionspolymerisation 173
synchron 357
Synchron|bahn 635
—maschine 356
—satellit 387
—signal 377
„Syncom" 638
Synthese|faserstoff 673
—gas 162
Synthetiks 707ff.
Szintillations|kamera 439
—scanner 439
—zähler 463

T

Tablettierung (Plaste) 189
Tabulator 412
TACAN 383
Tachometer 455
Tachymeter 424, Tafel 46
Tafel|bau 518
—deckung 536
—schere 270
—wand 538
Tagebau 20ff.
—gerät 331
—gerätesicherheit 30
—sicherheit 30
Täkszwicken 715
Taktstraße 303
Talsperre 563f., Tafel 59
Tamboure 258
Tandem|ofen 119
—walzwerk 154
Tankentwicklungsgerät 643
Tanker 609
Tank|prahm 615
—schiff 609
Tantal 110, 137
Taschen|förderer 327
—rechner 413
Täschnerwaren 716
Tastomat Tafel 71
Tastregler 477
Tatzlagermotor 580
Tauchankermagnet 360
Tauchen 210, 298f.
Tauch|härten 295
—kolbenmotor 605
—körper 556
—körperprinzip 457
Tauchspul|magnet 360
—mikrofon 390
Tauch|verfahren (Plaste) 193
—verzinken 299
Tau|punkthygrometer 460
—röste 670
—salz 166
Technische Gebäudeausrüstung 542
Teer 507
—scheider 77
Teildruckform 647
Teilen 675
Teil|mengenentgasung 122
—sohlenbau 35
—strahlungspyrometer 460
—vorrichtung 292
Telefonie 371
Telegrafie 373
Telekobaltbestrahlungsgerät 439
Telemetrie 436
Teleobjektiv 425
Teleskopwelle 308
Teller|aufgeber 330
—stanze 714
—trockner 60
Tellur 137
Temperatur|messung 459
—warnanlage 392
Temperguß 108
Tempern 197
Tensionsthermometer 459
Teppichwebmaschine 683, Tafel 78
Terrazzo 539
Tetrachlormethan 172
Tetrode 397
Textil|prüfung 699
—technik 670ff.
—veredlung 690
Texturieren 679
TGL 721
Thallium 137
Theaterkopie 428
thermionischer Generator 74
Thermistor 349, 393
Thermo|druck 692
—element 459
thermoelektrischer Effekt 74
— Generator 74
thermoelektrisches Prüfverfahren 470, 471
Thermo|kompression 404
—kopie 654
Thermolyse 299
Thermo|meter 459
—plaste 175, 187
—syphonkühlung 594

Thermoumformer 448
Thioplast 177
Thixotropie 18
Thomas|-Konverter 116
–mehl 116, 170
– -Stahl 107
Thomson-Brücke 449
Thyristor 401
–stromrichter Tafel 44
Tief|bahn 588
–bau (Bergbau) 30
–bohrung 16
–brunnen 551
Tiefdruck 653
–farbe 184
–maschine Tafel 72
Tief|gangsmarke 606
–gründung 511
–ladewagen 582
–lochbohrer 279
–löffelbagger 331
–pumpe 45
–temperaturentgasung 76
–ziehen 195, 267
–ziehpresse 262
Timer 496
Tischrechner 413
Titan 110, 131
–weiß 132
Titration 464
„Tokamak"-Versuchsanlagen 70
Toleranz 305
Toluol 172
Tomograf Tafel 49
Tomografie 438
Ton 223
Tonerde 131, 224
–hydrat 224
–zement 218
Tonfrequenz-Multiplex-Fernsteuerung 482
Tonne 611
Tonnenschale 525
Tonnete 611
Tontagebau [illegible]
Topfkreisresonator 396
Tor (Transistor) 400
Torf 75
Totalreflexion 417
Tot|pumpe 44
–punktfederantrieb 410
Towgarn 678
Träger|flotation 56
–rakete 632
–rost 531
Trageversuch 701
Trag|fähigkeit 607
–flächenboot 615, Tafel 64
–flügel 624
Trägheits|navigation 629, 634
–plattform, kreisstabilisierte 633
Trag|kettenförderer 327
–rolle 325
–schicht (Straßenbau) 568f.
–seil 592
–werk 516, 524f., 624
–zapfen 308
Trame 678
Trampschiffahrt 612
Tränkmakadam 569
Tränkung 243
Transduktor 365
Transfer|preßwerkzeug 208
–straße 303
Transformator 359, Tafel 41
Transistor 399ff.
–funktion 405
Transit|hafen 612
–verkehr 613
Translationsschale 525
Transponder 383
Transportieren 24
Transport|behälter 335
–flugzeug 617
–packung 667
–schiff 609
Trapezflügel 624
Trasse 565
Trawl 609
Trawler 609
Treiben 265
Treibeofen 130
Treib|mittel 290
–netzfischerei 610
–scheibe 321
–scheibenaufzug 341
–stoff 184f., 633
–stoffkombination 632
Trennebene 24
Trennen 260, 269, Tafeln 31–33
–, elektrisches 271
–, thermisches 270
Trenn|mittel 290
–säge 281
–schleifmaschine 282
–verfahren (Textilt.) 695
–wand 538
Treppe 539
Trevira 178
Tribidtriebwerk 633
Trichterstrahler 389
Trieb 309
–, hydrodynamischer 311
–fahrzeug 579
Triebwerk (Kfz) 599
– (Flugzeug) 622
–überwachung 628
Triftröhre 397
Trimm 603
Trimmer 394
Tri|metalldruckform 649
–nitrotoluol 185
Trinkwasser 550
Triode 397
Triogerüst 150
Triphenylmethanfarbstoff 182
Trittstufe 540
Trocken|anlage (Ledert.) Tafel 80
–batterie 72
–bohren 14
–dienst (Braunkohle) 60
–eis 102
–element 73
–kokskühler 77
–mauerwerk 519
–metallurgie 125
–partie (Papiermaschine) 257
–pressen (Keramik) 225
–putz 540
–schwindung 223
–spinnen 678
Trocken|spinnverfahren 178
–steigleitung 547
–stoff (Druckfarben) 184
–veredlung 692
–verfahren (Faserplatten) 249
–verfahren (Silikatt.) 218f.
–zurichtung (Rauchware) 706
Trocknung 58, 225, 242, 692
Trog 514
–bandförderer 326
–brücke 533
–kettenförderer 328
–mischer 58, 190
–verfahren (Baut.) 529
Trommel|aufzug 342
–bremse 597
–hackmaschine 249
–magnetscheider 55
–mischer 58
–mühle 52
Trommeln 283
Trommelvulkanisiermaschine 212
Tropfenkondensation 95
Tropfkörper 555
Trübungsmittel 238
TTL 405
TU-144, 618, 625, Tafel 67
Tube 664
Tubus 423
–kamera 425
Tuftingmaschine 689
TUL-Prozeß 320
Tunnel|diode 399
–ofen Tafel 21
–schalung 528
–vortrieb 38
–vortriebsmaschine Tafel 3
Tür 541
Turas 322
Turbine 92f., Tafeln 7, 8, 11
Turbinenschaufelstahl 107
Turbo|generator 357
–löser Tafel 26/27
–satz Tafel 5
Turm 534
–bleiche 254
–drehkran 340, Tafel 55
–fördermaschine 343
–verfahren (Schwefelsäure) 162
Türverriegelungsanlage 392
Tuschieren 275
Typenhebel 412, 413
–getriebe 412
Typen|kette 412
–leiste 412
–träger 411
typografisches System 645

U

U-Bahn 589
Über|bau 533
–druckturbine 92f.
–fallwehr 562
Übergabeeinrichtung (Fördert.) 330
Übergangs|bereich (Duroplaste) 188
–bogen (Straßenbau) 565

Über|härtung 197
—hitzer 87f., Tafel 8/9
—kopflader 347
—lagerungsempfänger 376
—nahmeschiff 609
—reichweite 356
—schallpassagierflugzeug 618
Übersetzungs|getriebe 309
—programm 498
Über|stau 556
—träger (Elektrot.) 394f.
Übertragungs|glieder 473
—kanal 482
—technik 369
—wagen 375
Überwachungsanlage 391
Ufer|befestigung 557
—sicherung 558
Uhren 407ff.
Uhrwerk 409
UKW|-Drehfunkfeuer 382
— -Sender 376
Ultrabeschleuniger 206
Ultraschall|diagnostikgerät 436
— -Echoverfahren 437
—schweißen 197, 288, 698
—therapiegerät 436
—verfahren (Werkstoffprüfung) 469
Umbruch (Setzt.) 645
Umformautomat 262, Tafel 30
Umformen (Metall) 261ff., Tafeln 29, 30
— (Glas) 234
— (Holz) 243
— (Leder) 713
— (Plaste) 194ff.
Umformer 364
Umform|technik, Sonderverfahren 268
—verfahren (Metall) 148
—verfahren (Plast) 194ff.
Umhüllen 669
Umkehrspülung 91
Umlauf|aufzug 343
—betrieb bei Seilbahnen 592
—entgasungsverfahren 122
Umlaufkolben|pumpe 97
—verdichter 99
Umlaufschmierung 312
Umreifen 669
Umschlag 617
Umschlagshafen 617
Umschlagtechnik 587
Umschmelzverfahren 119f.
Umsetzverfahren (Eisenbahnt.) 573, Tafel 61
Umspuren 573
Umwälzpumpe 98
Unifizierung 302
unit operations 159
Unipolartransistor 400
Universal|bagger 331, Tafel 38
—hafen 612
—kessel 211
—motor 358
—preventer 17
—punktklebemaschine Tafel 75
Unruh 407
—motor 410
Unstetigförderer 320
Unterbau (Brücke) 533
— (Straße) 574
Unter|bettungsschicht 568
—brandofen 542
—decke 539
—flurmotor 599
Untergrund (Straßenbau) 567
—abdichtung 563
—bahn 589
—gasspeicher 84
Unter|pflasterbahn 588
— -Pulver-Schweißen 286
—setzungsgetriebe 309
—suchungsleuchte 431
—tagevergasung 80
Uran 137
Urformen (Metall) 120f., 139ff., 143ff., 261, Tafel 28
— (Plaste) 190ff.
U-Rohr-Manometer 457, 458
Urspannung 349
USART-Schaltkreis 493

V

Vakuum|bedampfen 300
—behandlung von Stahl 121
—blockguß 122
—induktionsofen 122
—kolonne 85
—lasthaftgerät Tafel 39
—lichtbogenofen 122
Vanadin 110, 134
Varaktordiode 399
Variometer 627
Vario-Optik 425
Varistor 393
V-Bahn 589
„Venera" 639
Ventil 313, 318, 479
—stahl 107
Venturi|düse 458
—wascher 77
„Venus" 639
Verarbeitungsschiff 609
Verband 520
Verbindungs|element 305
—mittel 515, 530
—schweißen 285
Verbraucherpackung 667
Verbrennung 159
Verbrennungs|kraftmaschine 90
—motor 90ff., 594
Verbund|dach Tafel 57
—fenster 541
—folie 198
—lochkarte 415
—netz 362
—system (Kautschuk) 212
—werkstoff (Holz) 246
— (Metall) 107
Verdampfer 63
Verdichten (Boden) 515
— (Holz) 243
Verdichter 96ff., 317
—station 82
Verdrängungsschiff 615
Verdunstungstrocknung 243
Verdüsungsanlage 552
Veresterung 160
Verfahrenstechnik, chemische 159
Verfestigen 235
Verflüchtigen 125
Verformung, elastische 202
—, plastische 466
Vergärung 253
Vergaser|kraftstoff 86
—motor 90
Vergasung 78, 81
Vergießen 290
Verglasung 542
Vergrößerung (Fernrohr) 424
Vergüten 235, 296
Vergütungsstahl 107
Verhiebsarten 26
Verhol|spill 604
—winde 604
Verjüngen 266
Verkehrs|art der Binnenschiffahrt 613
—flugzeug 617
—mittel 320, 572
—spur 566
—wasserbau 558
Verkettung 669
Verkettungseinrichtung 293
Verkippungselemente 24
Verknüpfungsglieder 480
Verkokung 76
Verladebühne 341
Verlustschmierung 312
Vermittlungsstelle 373
Vernadeln 688
Vernetzungs|mittel 205
—verfahren 211
—vorgang 188
Verpackungs|funktionen 660
—linie 669
—maschine 665ff.
—mittel 661
—technik 660ff.
—werkstoffe 661f.
Verriegelung 309
Versatz 515
Verschlackung 68
Verschließmaschine 666
Verschluß (Kamera) 425f.
Verschnittbitumen 568
Verseifung 160
Versorgungshafen 617
Verspiegeln 235
Versprödung 197
Verstärkungsregelung 377
Verstell|propeller 606
—pumpe 315
Vertäuausrüstung 604
Verteilerstab 522
Verteilungsnetz 362
Vertikal|antenne 388
—kammerofen 76
—lot 458
Vervielfältigungstechnik 654f.
Verzögerungs|bremse 323
—glieder 480
Verzug 675
Vibrations|gleitschleifen 283
—meßwerk 447
—walze 569
Vibroflotation 513
Vickersverfahren 467

Videospeichergerät 377f.
Viehsalz 166
Viel|fachmeßgerät 448
–stoffmotor 595
Vier|taktmotor 90
–taktverfahren 594
–walzen-Blechbiegemaschine 264
Vigognegarn 677
Vinyl|chlorid 173ff.
–faser 178
Viskoseseide 178
Viskosität 18, 43
Viskositäts-Temperatur-Verhalten 181
Vitrokeramik 237
Vliesstoff 687f.
V-Motor 92
Voith-Schneider-Propeller 606
Voll|abschlußpreventer 17
–bohren 14
–dünger 170
–pappe 662
–rad 578
–steifrahmen 532
–wandträger 516, 531
–ziegel 520
Voltexverfahren 689
Volumendosierung 667
VOR (Funkfeuer) 382
VOR-DME 383
Vorformling (Plaste) 193
Vorgarn 677
Vorkammerverfahren 91
Vorrangsteuerung 496
Vorrichten 714
Vorrichtung (Bergbau) 33
– (Fertigungst.) 291
Vorrollen 258
Vorsätze von Maßeinheiten 719
Vorschaltprozesse 64
Vorschub|bewegung 272
–rost [illegible]
Vorsignal 576
Vorspinnen 677f.
Vortrieb 37f.
Vortriebsmittel 606
Vorverdampfung [illegible]
Vorwärmen 293
„Voyager" 639
Vorzugszahlen 722
VT-Faltelement Tafel 55
Vulkanfiber 174, 712
Vulkanisation 174, 205
Vulkanisier|bad 212
–presse 208
–schrank 211f.
–tunnel 212

W

Waage 455
Waagerecht|-Bohr-und-Fräs-Werk 280
– -Stauchmaschine 263
Wachs 179
–papier 662
Wagen (Eisenbahn) 582
Waggonkipper 588
Walfangmutterschiff 610
Walken 690, 706
Walzbiegen 268
Walzen (Erdbau) 515
Walzen (Glas) 232
– (Metall) 106, 140, 148ff., 266
Walzen|brecher 51
–fräser 280
–krempel 675
–mühle 51
–scheider 56
–schmelzanlage 711
Walzgerüst 149
Wälzlager 307
–stahl 107
Walz|maschine Tafel 30
–prägen 266
–straße 150
–ziehen 267
Wandbelag 540
Wander|feldröhre 397
–rost [illegible]
–tisch 326
Wankel-Motor 92
Wannenofen 231
Warm|arbeitsstahl 108
–auslagern 296
–bandstraße 151
–breitbandstraße 151
–dach 536
Wärme|(aus)tauscher 96
–behandlung (Metall) 106, 293ff.
–dämmstoff 508
–formbeständigkeit 188
–impulsschweißen 196, 698
–inhalt 87
–kraftwerk 61f.
–leitfähigkeit 189
–pumpe 100, 103
–übertrager 96
Warm|formgebung 106
–kammer-Druckgußverfahren 143
–kreissäge 281
–nieten 289
–preßverfahren 192
–umformung 148ff.
Warmwasser|röste 670
–heizung 543
–umwälzpumpe 98
–versorgungsanlage 547
Waschmittel 180
Wasser|abgabe (Bergbau) 18
–aufbereitung 552
–bau 556
–dampf 87
– -Dampf-Prozeß 62
–fluten 46
–gas 76ff.
–gewinnung 550
–glas 217
–haltung, offene 514
–härte 550
–kraftwerk 70ff., Tafel 7
–rohr-Dampferzeuger 89
–speicherung 552
Wasserstrahl|antrieb 606
–schneiden Tafel 79
Wasser|straße 616
–tiefenmessung 457
–turbine 92
–turm 552
Wasser|versorgung 550ff.
–versorgungsanlage (Kraftwerk) 63
Wasser|waage 453
–wirtschaft 550
Weberei 681
Webmaschine 682
Wechsel|aufbau 587
–fließreihe 302
–getriebe 600
–plattenspeicher Tafel 50
–richter 365
–spannungskompensator 449
Wechselstrom 352
–generator 352
– -Meßbrücke 449
–motor 358
–tachometer 455
–zähler 448
Wecker 409
Wegeventil 318, Tafel 35
Wehrbau 561
Weiche (Eisenbahnt.) 573f.
– (Ledert.) 704
Weich|glühen 294
–gummi 206
Weichheit 212
Weich|macher 205
–paraffin 181
–porzellan 228
–tauchlöten 289
Weiß|ätze 691
–blech 663
Weiten 268
Weithalsbehälter 663
Weitungsabbau 23
Weitwinkelobjektiv 425
Wellasbestzementdeckung 537
Welle 308
Wellen|brecher 560
–fachwebmaschine 683
–länge 355
–leiter 395
–optik 419
Well|pappe 662
–rohrfedermanometer 456
–tafeldeckung 536
Welthandelsflotte 608
Wende|getriebe 408
–kreisel 627
Wendel|antenne 389
–schwingrinne 329
Wende|zeiger 627
–zug 583
Werggarn 678
Werk|flotte 612
–hafen 617
–standards 722
–stättenfertigung 302
–stoff, keramischer 222
–stoffprüfung 464
–stückspanner 292
Werkzeug|maschine 274
–schleifmaschine 282
–spanner 292
–stahl 105, 108, 273
–winkel 272
Wetter|beobachtungssatellit 638, Tafel 96
–führung 39
–schutzschale 532
–sprengstoff 186

Wheatstone-Brücke 449
Wickel|karton 662
—verfahren 192
Widerstand (Bauelement) 392f.
—, elektrischer 352f.
Widerstands|löten 289
—manometer 457
—messung 451
—schweißen, elektrisches 287
—thermometer 459
Wieder|holteilkatalog 302
—nutzbarmachung 29f.
WIG-Schweißen 286
Wild|bachverbauung 557
—kautschuk 203
Wind|erhitzer 113
—kraftwerk 74
—rispe 517
—sichtung 53
—verband 532
—werk 324
Winkel|endmaß 452
—libelle 453
—messer 452f.
—stützmauer 513, 561
—verkörperung 452
Winkler-Generator 78, 164
Wippdrehkran 340
Wirbel|bettverfahren 212
—kammerverfahren 91
—schicht-Hydriervergasung 81
—schmelzkammer 89
—sintern 194
Wirbelstrom 350
—bremse 579
—elektrode (Medizint.) 438
— -Prüfverfahren 470
—verlust 350
—tachometer 455
Wirk|druckverfahren 458
—leistung 354
Wismut 110, 131
Wobbeln 397
Wolcrylon 175
Wöhlerkurve 467
Wolfen 677
Wolfram 110, 134
Wolle 671
Woll|feinheitsprüfer 699
—fett 677
—spinnverfahren 677
—waschmaschine 677
Wolpryla 178, 673
Wort (Informationst.) 486
„Wostok" 640, Tafel 68/69
Wurf|schaufellader 347
—sieb 53
Wulstbug Tafel 65

X

Xenonlampe 368
Xerografie 655
Xylol 172

Y

Yagiantenne 376, 389

Z

Zählschaltung 481
Zahngesperr 309
Zahnrad|bahn 590
—fräsen 281
—pumpe 97, 316
—schleifmaschine 282
—stoßmaschine 275
—trieb 310
—warmwalzmaschine 264
Zahnstangen|aufzug 343
—winde 336
—lenkung 599
Zählpolen 127
Zapfen 308
Zargentür 541
Zäsium 135
Z-Diode 399
Zeilen|setzmaschine 646, Tafel 71
—sprungverfahren 377
Zeit|charter 612
—dehnung 427
—lupe 427
Zeitmultiplex|betrieb 495
— -Verfahren 482
Zeitplan|geber 476, 480
—regelung 476
—steuerung 479
Zeit|raffung 427
—teilung 372f.
Zellen|pumpe 97
—radaufgeber 330
—verdichter 99
Zellstoff 252
— -und Papiertechnik Tafel 26/27
Zelluloid 174
Zellulose 174, 241
—azetat 174
—chemiefaserstoff 672
—ester 190
—faserwerkstoff 712
—nitrat 174, 185
—xanthogenat 178
Zement 214ff.
Zementation 125
Zement|beton 570
—klinker 161
—kupfer 127
Zentimetermaß 712
Zentral|einheit 487ff., Tafel 50
—mahlanlage 89
—mischverfahren 569
—schmierung 312
—verschluß (Kamera) 425
Zentrifugalkraftabscheider 58
Zentrifugenspindel 678
Zerfasern 255
Zerkleinerungsmaschine 51
Zerspankraft, resultierende 272
Zerstäuberbrenner 89
Zerstreuungslinse 419
Zerteilen 269
Zersetzungstemperatur 188
Zetteln 682
Ziegel|deckung 536
—mauerwerk 520,
—ton 223
Ziehen 233
Zieh|formen 195
—schleifen 282
Zierverband 520
Ziffernkarte 415
Zink 111, 128
—druck 652
Zinken 244
Zinn 111, 129
—bronze 110
Zirkonium 111, 137
Zisterne 551
Zonen|floating 127, 137
—schmelzen 126
Zug|beeinflussung 577
— -Druckumformen 267
—fahrt 583
—feder 407
—festigkeitsprüfung 465f.
—gewicht 407
—maschine 594
—meldestelle 584
—prüfgerät 700
—seil 592
—stab 530
—umformen 268
—versuch 701
Zumahlstoff 217
Zündstoff 186
Zungenfrequenzmesser 447
Zurichten (Leder) 705
Zurichtung (Buchdruck) 651
Zusammentragen 657
Zuschlagstoffe (Straßenbau) 568
Zuschnitt 695
Zustellbewegung 272
Zwang|durchlauf-Dampferzeuger 89
—umlauf-Dampferzeuger 89
Zweiachsschlepper 345
Zweikraft|bremse 586
—lokomotive 580
Zweikreis|bremsanlage 598
—laufschaltung 69
Zwei|radfahrzeug 592
—raumkamera 642f.
—schienenbahn 588
—seitenbandübertragung 375
Zweiständer|-Exzenterpresse 261
— -Kurbelpresse 261
Zwei|stoff-Flüssigkeitstreibstoff 633
—strahlinterferometer 423
Zweistromturbinen-Luftstrahltriebwerke 622f.
Zweistufen-Mischverfahren 208
2-Stufen-Verfahren 247
Zweitakt|motor 90
—verfahren 594
Zwicken 715
Zwillingsschleuse 559
Zwirn 674, 679f.
Zwirnen 680
Zwischen|stufenvergütung 296
—verdichterstation 82
Zyanidlaugung 130
Zyklon 89
Zylinder 191
—schale 525



1
2 3
4

Tafel 1 Bergbau I

1 Sprenglochbohrwagen in einer Kaliabbaukammer
2 Kalksteintagebau mit fahrbarer Brecheranlage und Bandförderung
3 Schwimmgreiferbagger zur Kiesgewinnung
4 Hydrozyklonanlage





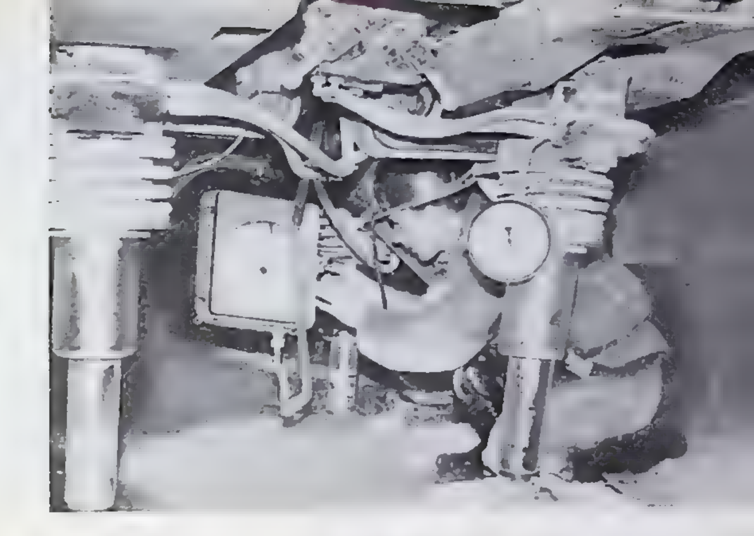




1 2
3
4

Tafel 2 Bergbau II

1 Braunkohlentagebau mit Abraumförderbrücke, *links* Bagger-, *rechts* Haldenseite, *links unten* Kohleflöz
2 Fahrbares Kombinationsbohrgerät zur Erkundung von Braunkohlenlagerstätten; im Vordergrund Rohrschüsse für den Bohrstrang
3 Bandabsetzer mit Zubringer *(links)*
4 Schaufelradbagger







1
2
3

Tafel 3 Bergbau III

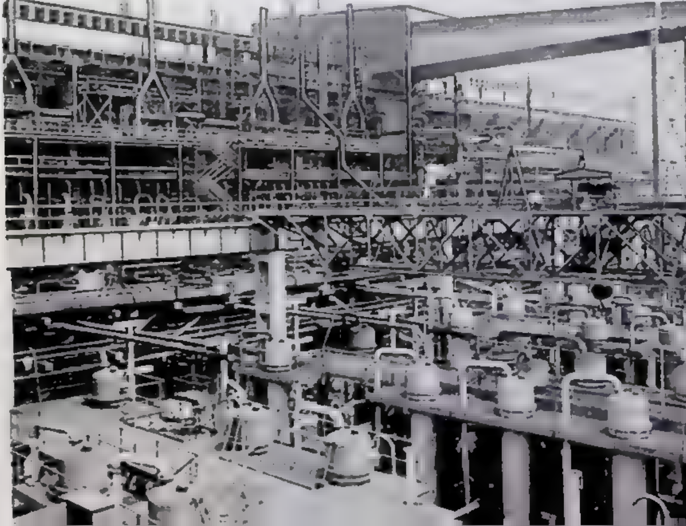
1 Hydraulischer Stützausbau im untertägigen Bergbau
2 Bohrkopf einer Tunnelvortriebsmaschine
3 Maschineller Abbau eines Flözes mit Kombine



1 2
3 4
5

Tafel 4 Bergbau IV

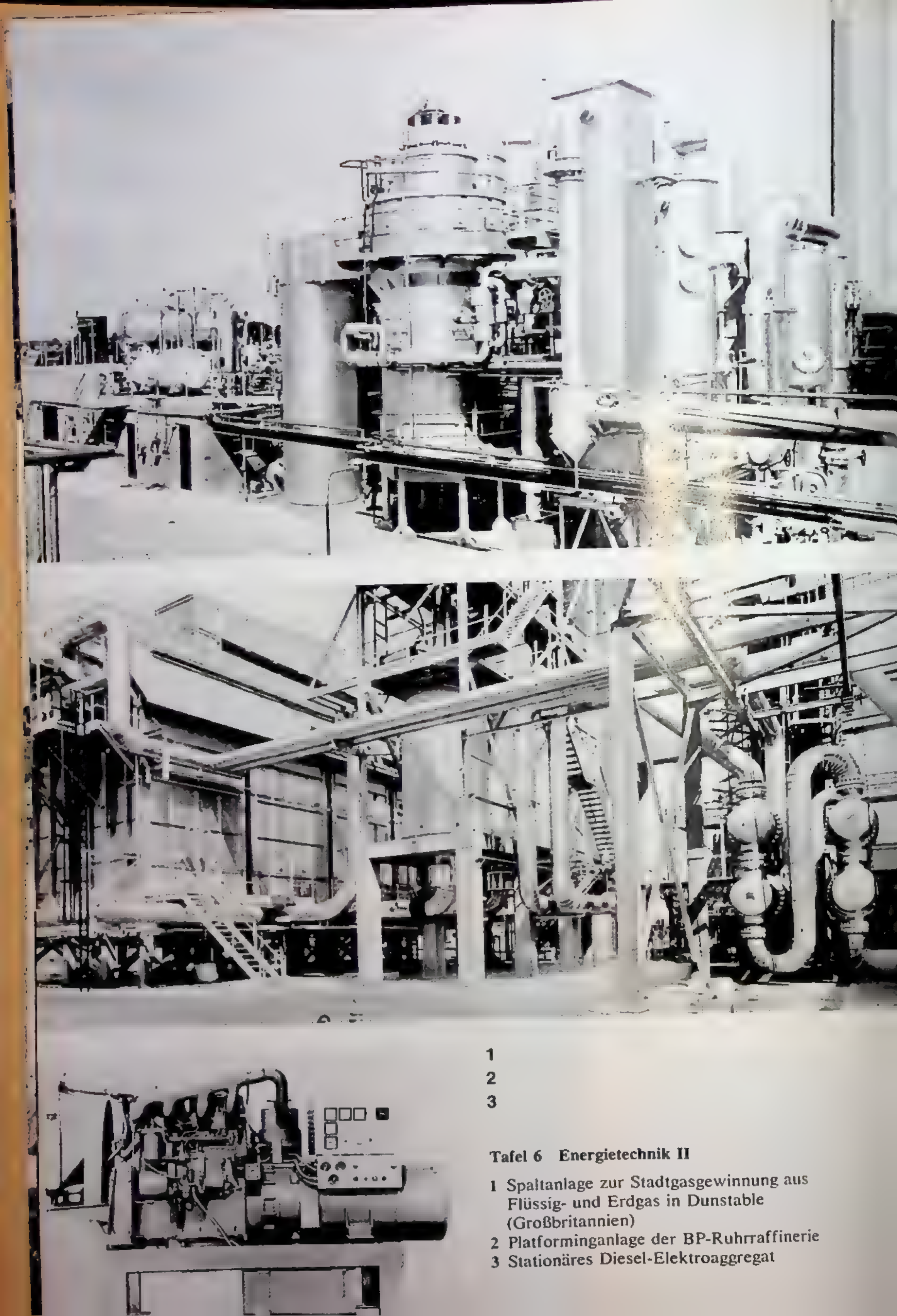
1 Kupfererz-Tagebau
2 Modernes Bohrgerät zur Herstellung von Schächten und Großbohrlöchern
3 Bohrplattform für die Erdölgewinnung in der Nordsee vor der Küste Norwegens
4 Einschwimmen einer 600000-t-Bohrplattform in der Nordsee
5 Vierarmiger Bohrwagen in einem hohen Kupfererz-Abbau



1
2
3

Tafel 5 Energietechnik I

1 Braunkohlen-Großkokerei Lauchhammer, *rechts* und *links* die Koksofenbatterien
2 500-MW-Turbosatz im Kraftwerk Hagenwerder III
3 Druckgaswerk „Schwarze Pumpe", *hinten* Generatorenhaus, *vorn* Kolonnen der Abhitzekessel



1
2
3

Tafel 6 Energietechnik II

1 Spaltanlage zur Stadtgasgewinnung aus Flüssig- und Erdgas in Dunstable (Großbritannien)
2 Platforminganlage der BP-Ruhrraffinerie
3 Stationäres Diesel-Elektroaggregat

1 2
3
4

Tafel 7 Energietechnik III

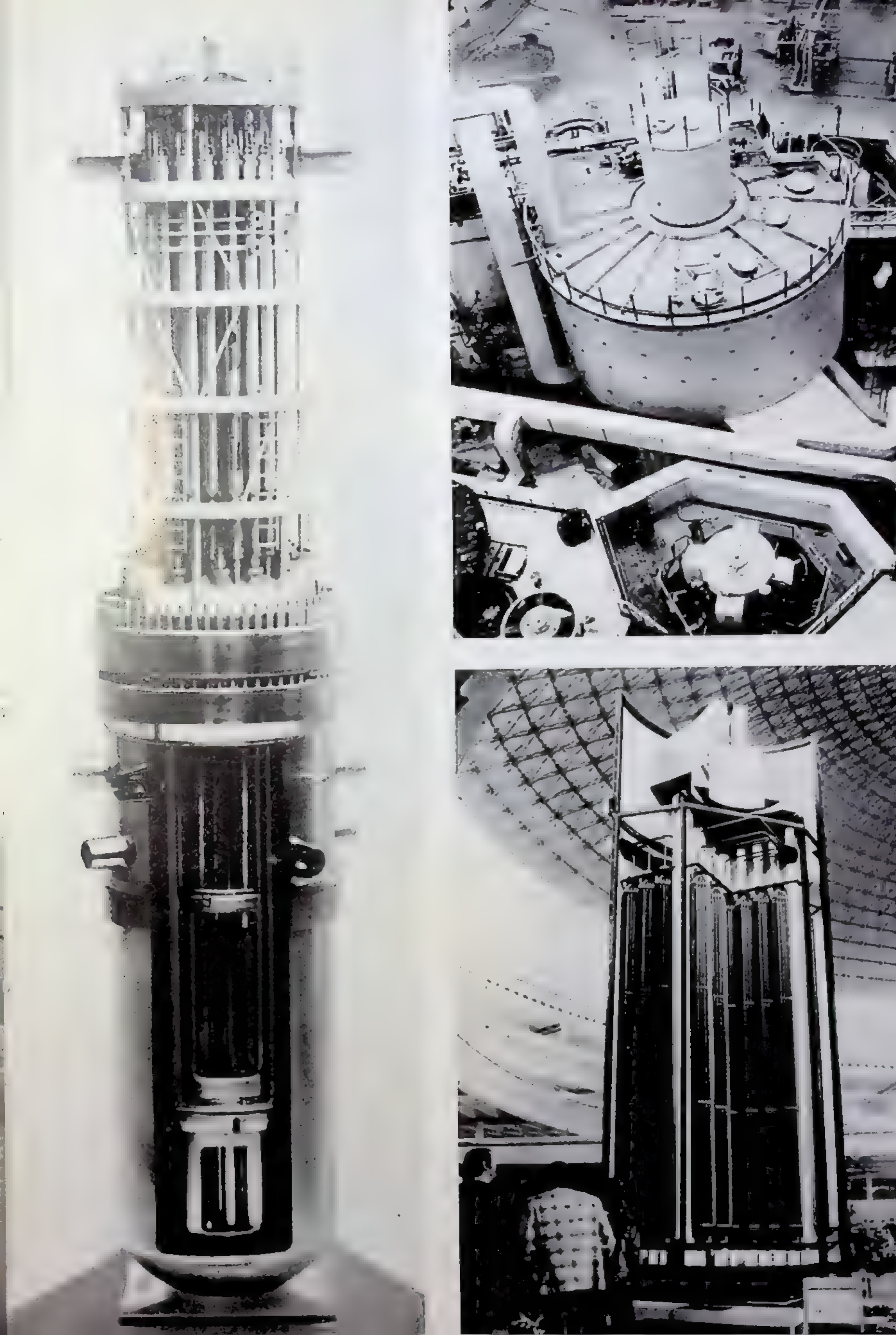
1 Krafthaus mit Turbinen des Wasserkraftwerks Bratsk (UdSSR)
2 Seja-Wasserkraftwerk im Fernen Osten der UdSSR; Bauarbeiten an der Staumauer
3 Staumauer des Wasserkraftwerks Bratsk (UdSSR)
4 Montage des Flügelrades einer Kaplanturbine



1 3 4
2
5

Tafel 8/9 Energietechnik IV/V

1 Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte II; das Oberbecken liegt 300 m über der Saale
2 Maschinensaal des Pumpspeicherkraftwerks Niederwartha bei Dresden; von *links*: Pumpe, Anlaufturbine, Motorgenerator, der als Elektromotor oder Generator wirkt, Turbine
3 Modell eines Druckwasserreaktors für Kernkraftwerke
4 Reaktorsaal des „schnellen Brüters" auf Mangyschlak (Kasachische SSR)
5 Schnittdarstellung eines Dampfseparators und Überhitzers

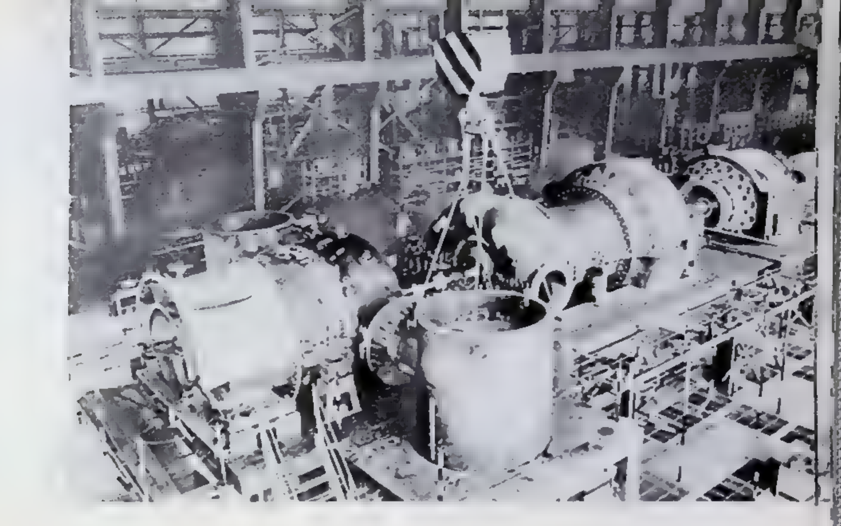


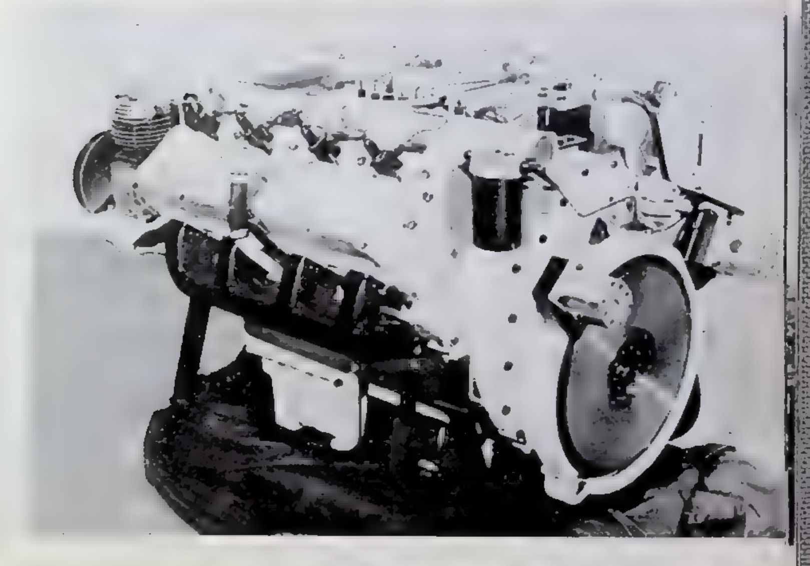


1
2
3

Tafel 10 Energietechnik VI

1 Verlegen eines Rohrleitungsstrangs mit Seitenbaumtraktoren
2 Hochleistungskreiselverdichter in radialer Bauart
3 Einpassen eines Lagerkörpers mit Welle in das Laufrad



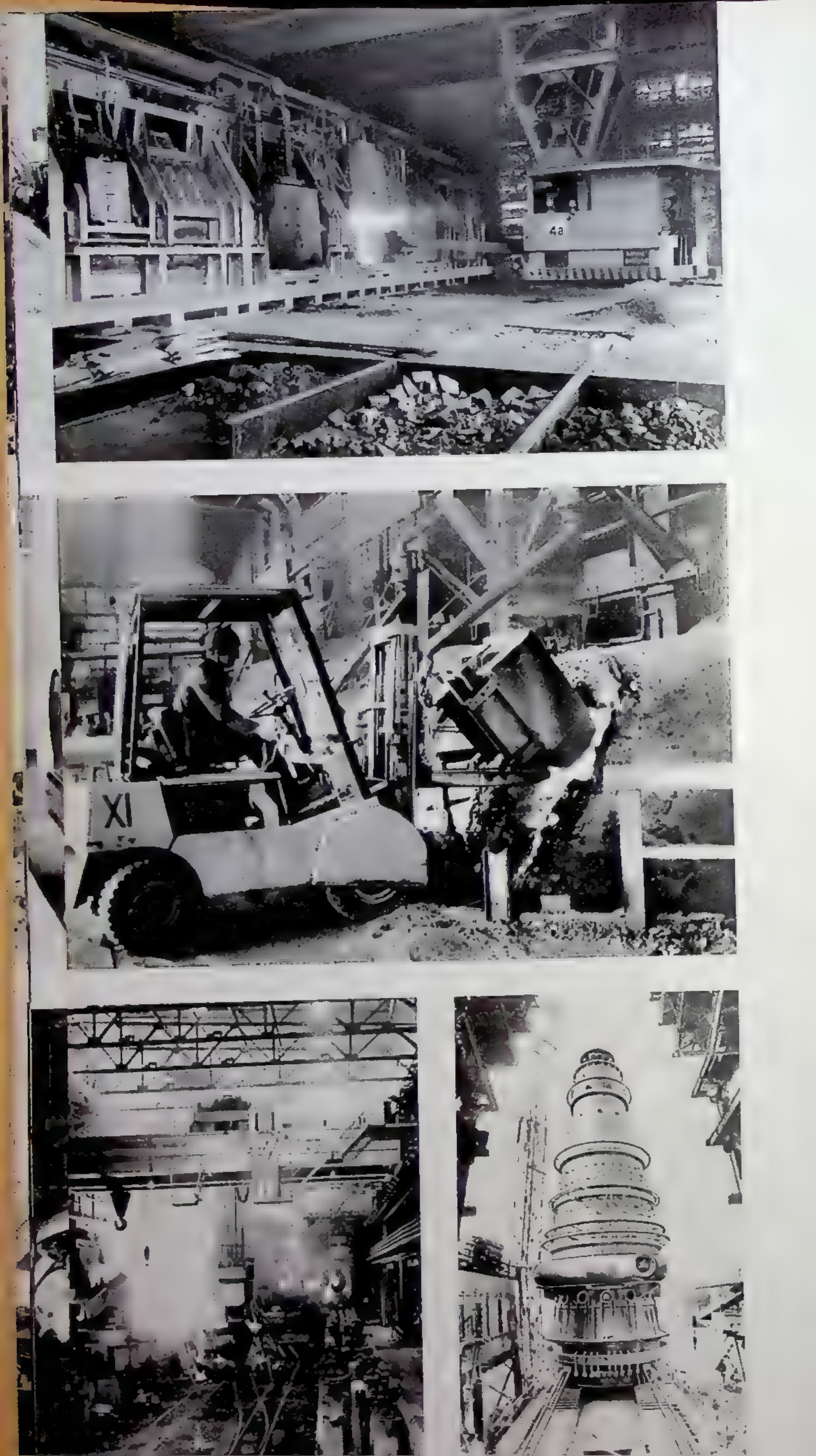


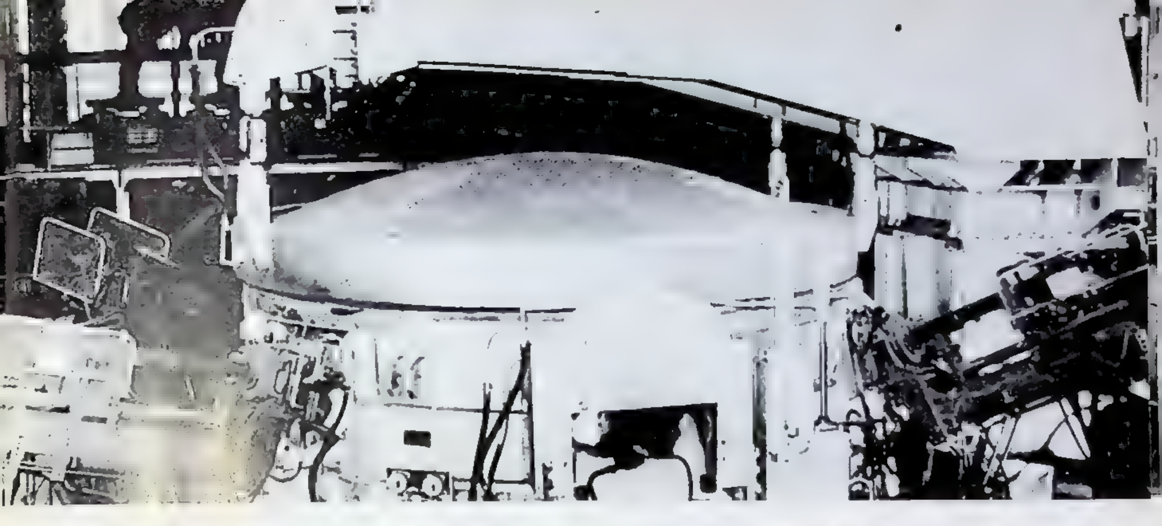


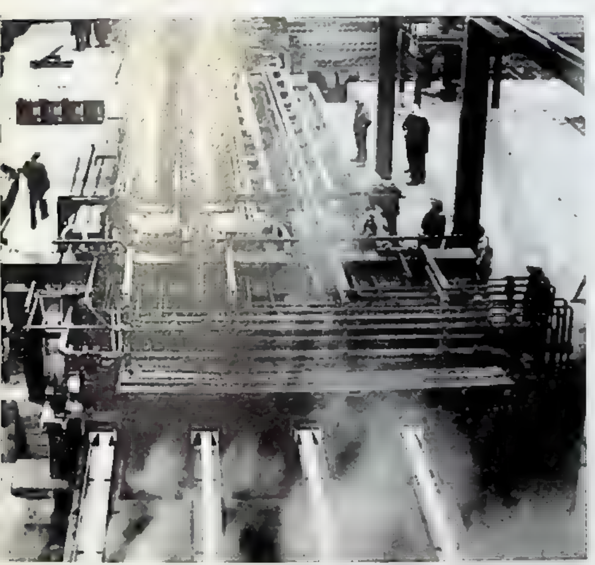
1
2
3

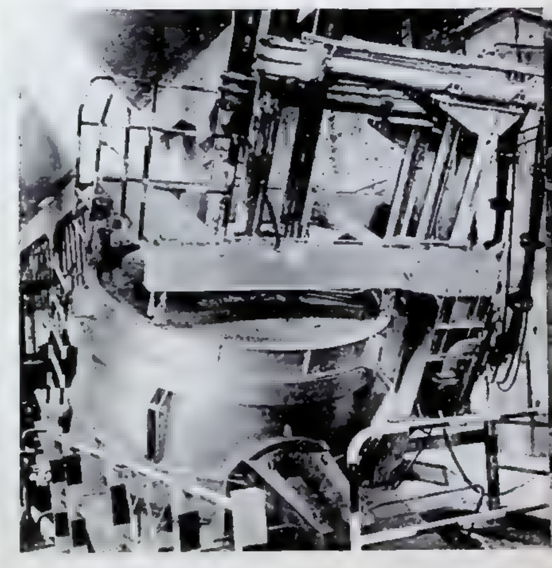
Tafel 11 Energietechnik VII

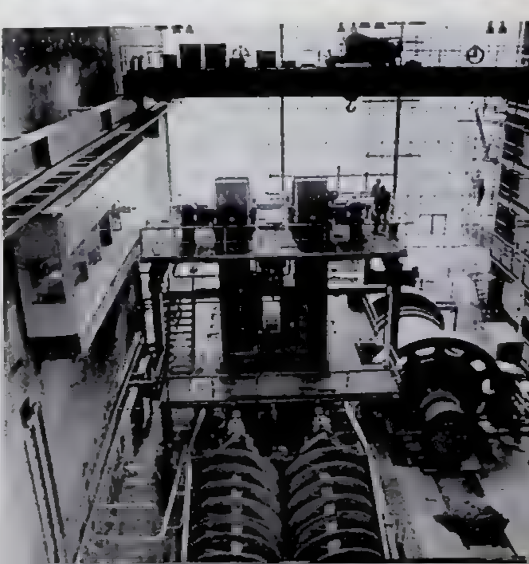
1 Montage einer Gasturbinenanlage
2 Dieselmotor mit 190 kW Dauerleistung; V-Motor
3 Turbinenhalle einer 50-MW-Heizkraftwerksturbine


4a
XI







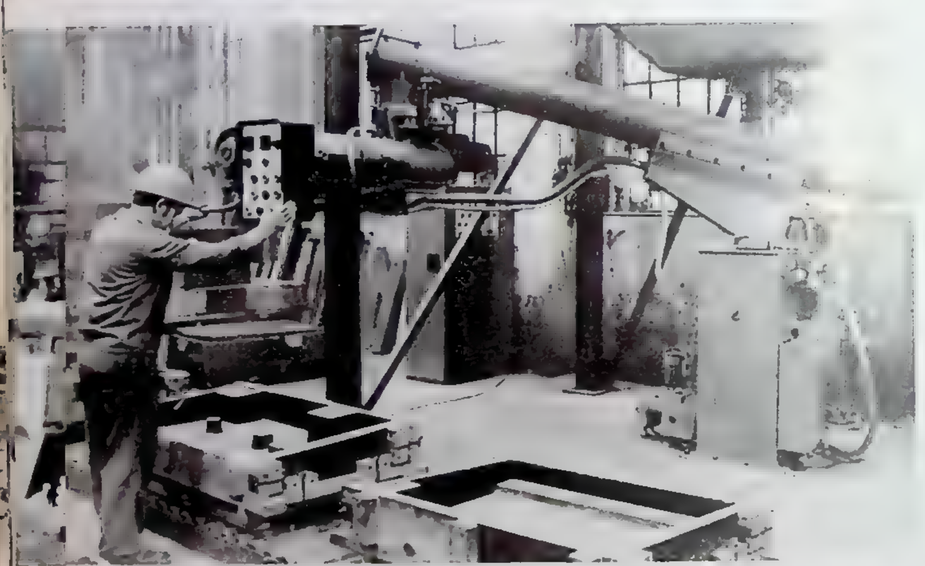


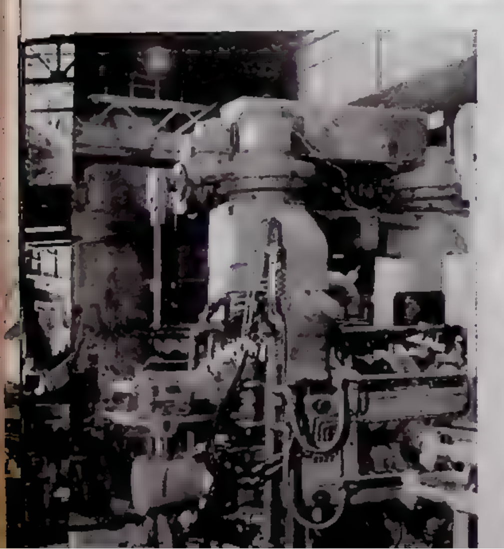
1		5	
2		6	7
3	4		8

Tafel 12/13 Metallurgie I/II

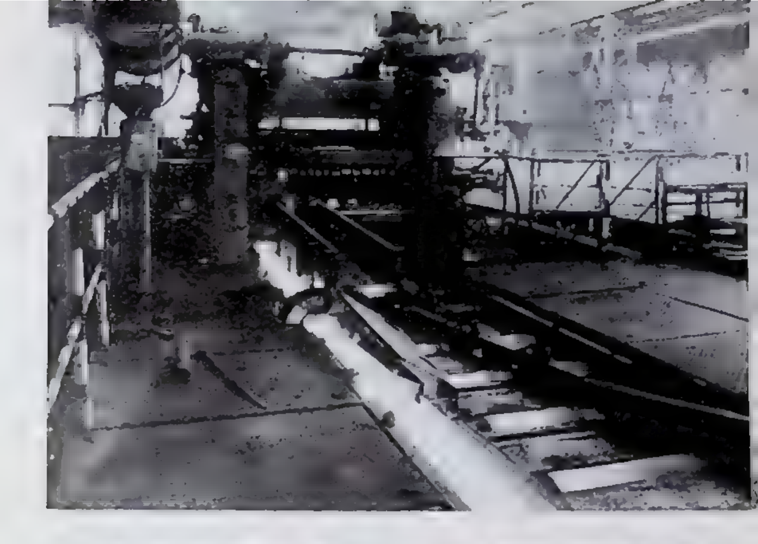
1 Chargieren am Siemens-Martin-Ofen
2 Chargierfahrzeug auf der Konverterbühne
3 Einpfannenabstich am Siemens-Martin-Ofen
4 Einfahren eines generalreparierten Hochofens auf 40 Rollen
5 30-t-Plasma-Elektronenstrahl-Schmelzofen
6 Knüppel-Stranggußanlage
7 3-t-Lichtbogenofen für hochwertige Stähle
8 Mühlenanlage der Zinnerzaufbereitung



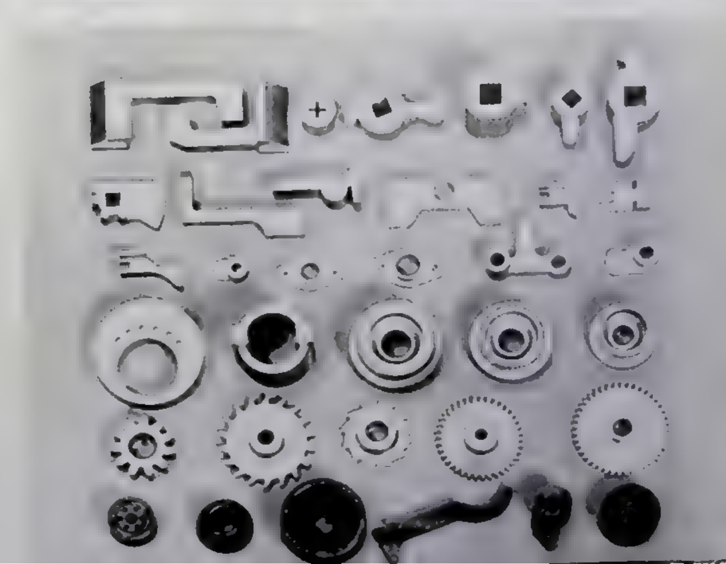








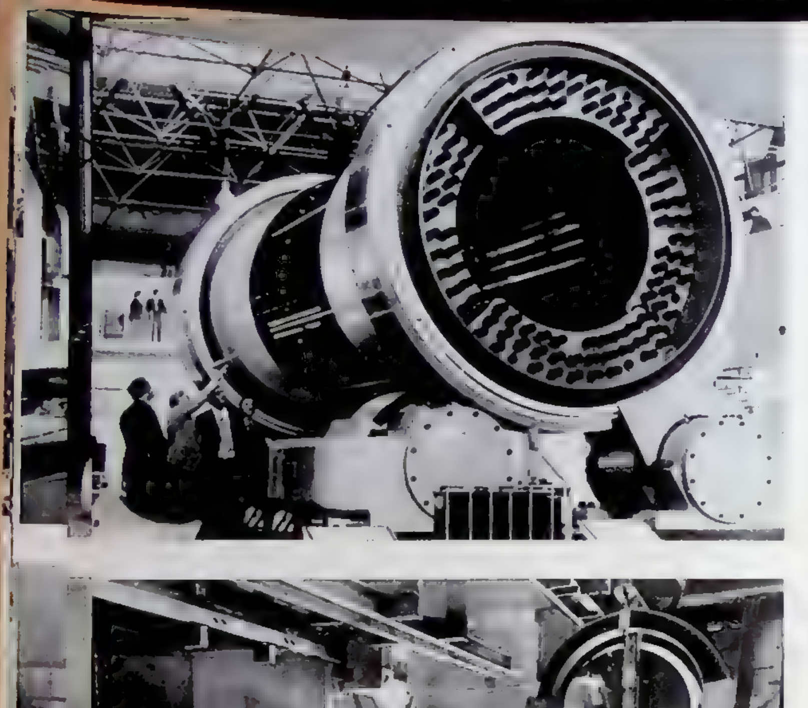


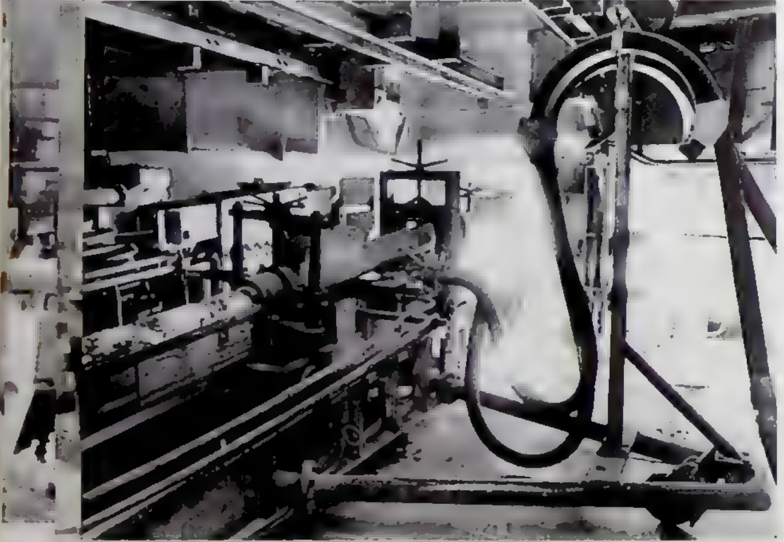


1		5
2		6
3	4	7

Tafel 14/15 Metallurgie III/IV

1 Elektronenstrahl-Bedampfungsanlage zur Korrosionsschutzbehandlung von Bandstahl
2 Durchlaufmischer
3 Horizontalwalzgerüst
4 3 200-t-Presse zur Bearbeitung von Kurbelwellenrohlingen
5 Duo-Warmwalzgerüst für Profile
6 Walzspalt eines Schrägwalzwerks (Mannesmannverfahren)
7 Pulvermetallurgische Formteile







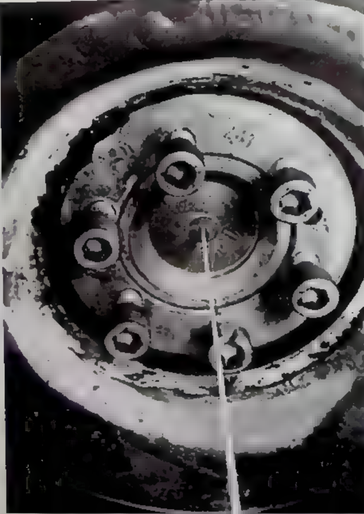
1 4 5
2 6
3 7

Tafel 16/17 | Chemietechnik I/II

1 8 m langes Segment eines Dampfröhrenkalzinators
2 Abstichmaschine am Karbidofen
3 Anlage zur katalytischen Nachverbrennung gasförmiger Schadstoffe
4 Erdölverarbeitungswerk Moskau mit 6 Mio t Jahresdurchsatz
5 Anlage zur Trocknung und Entschwefelung von Erdgas
6 Rohöldestillationsanlage in Schwedt; *vorn* Entsalzungsanlage
7 Hochdruckreaktoren zur Hydroformylierung von Olefinen


CHEMIEANLAGENBAU

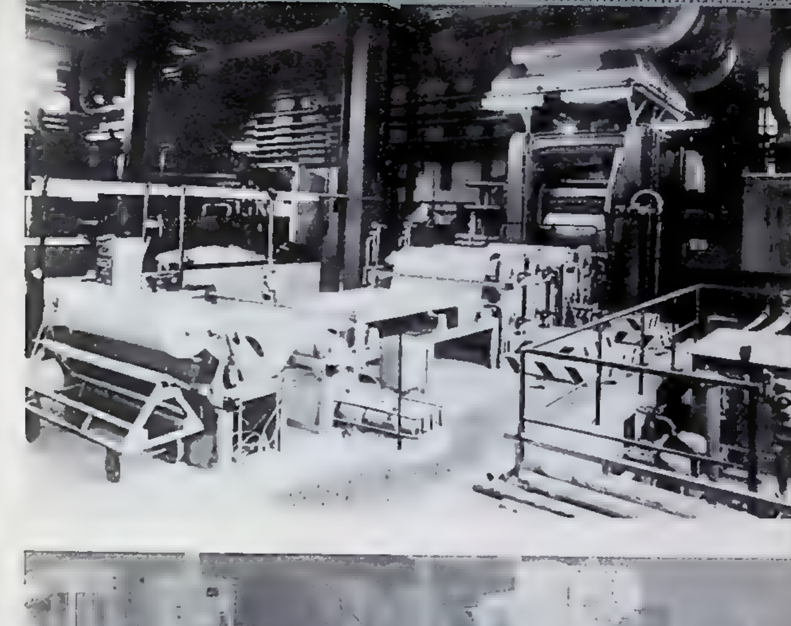


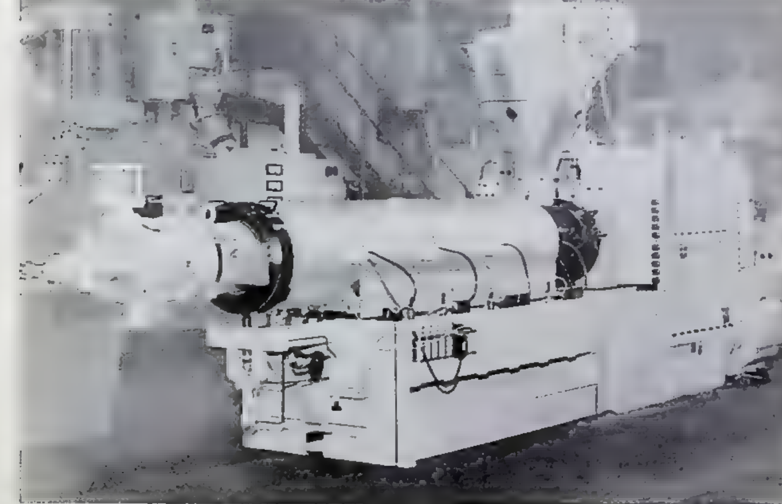


1
2
3 4

Tafel 18
Technik der Hochpolymere I

1 Hydraulischer Spritzgießautomat zur Herstellung von thermoplastischen Formartikeln
2 Schäummaschine für die Verarbeitung von Polyurethanen und Rundtischformen-Umlaufanlage
3 Blasen von Plastfolie für Verpackungszwecke
4 Spinndüse für Dederon-Monofil

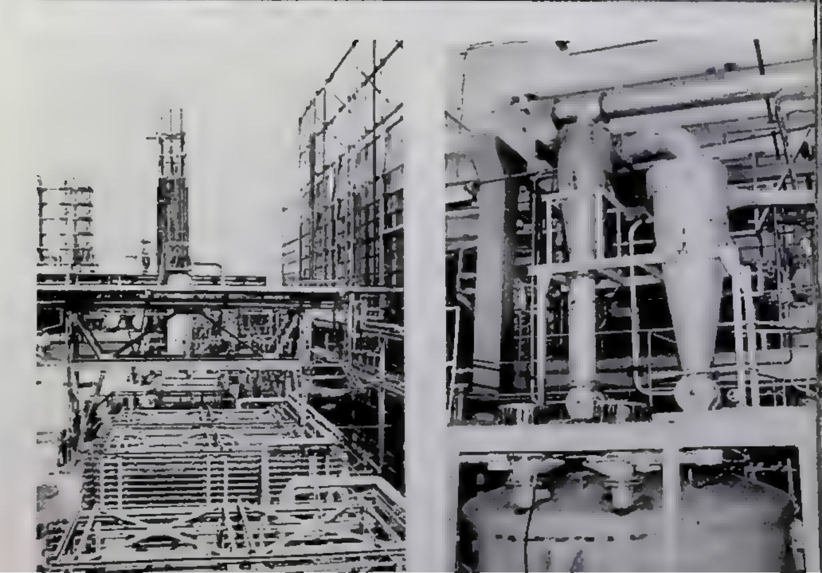




1
2
3 4

Tafel 19
Technik der Hochpolymere II

1 Kalanderanlage zur Herstellung von PVC-Folien
2 Doppelschneckenextruder für die Thermoplastverarbeitung
3 Syntheseanlage der Polyäthylenfertigung
4 Rohstoffaufbereitung für die Polyesterherstellung

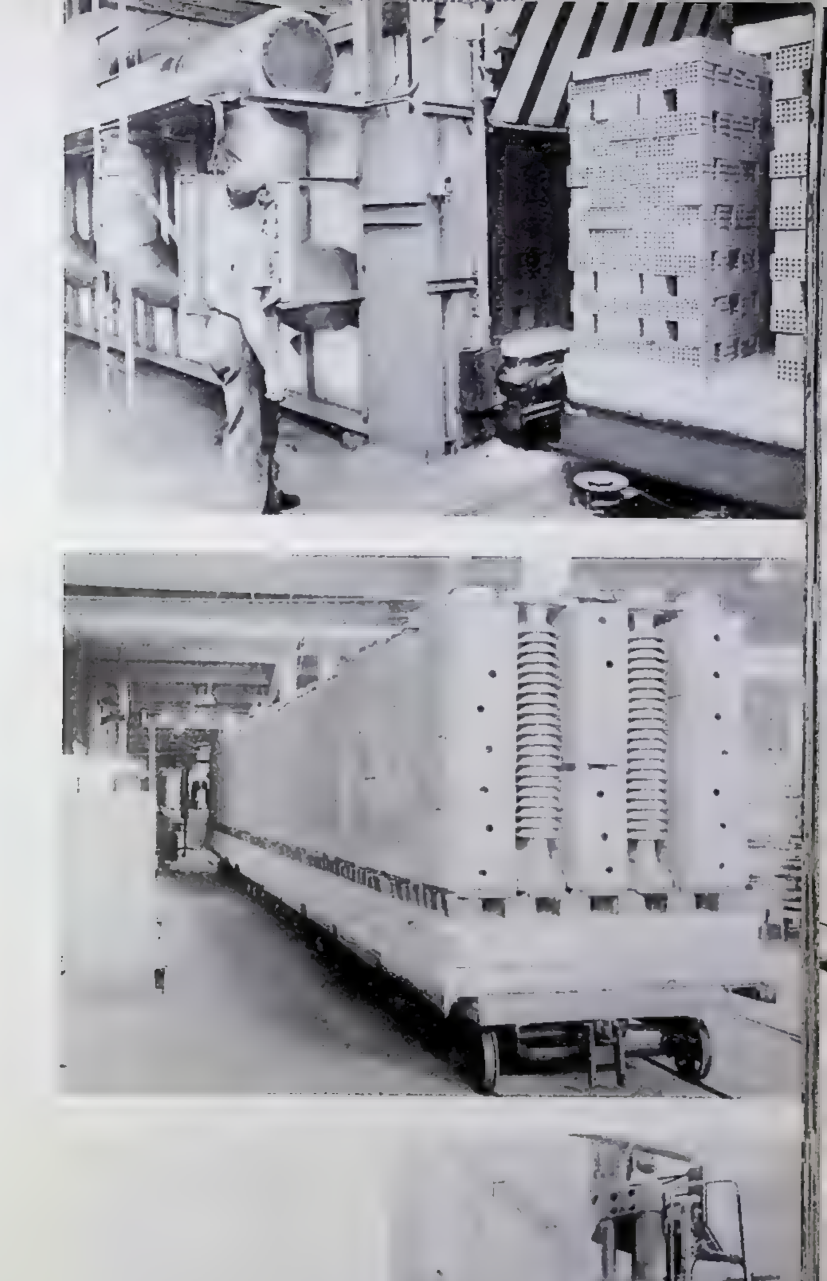




1
2
3

Tafel 20 Silikattechnik I

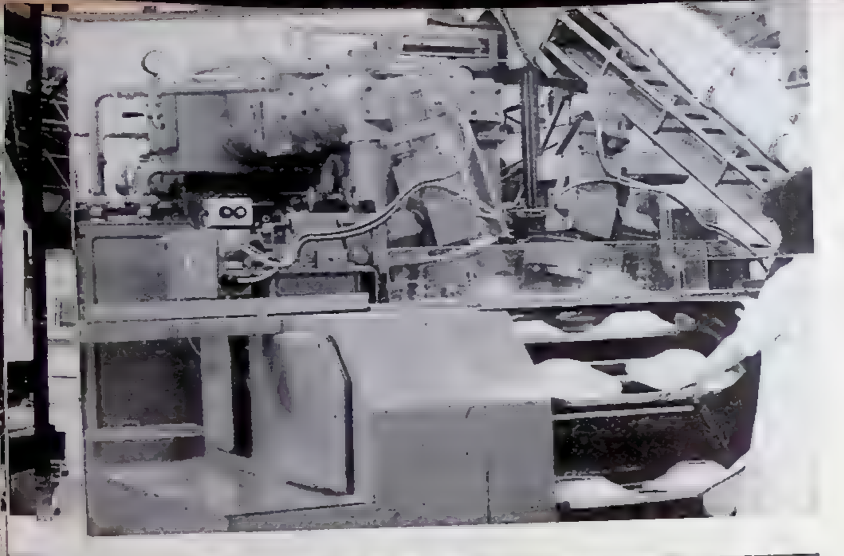
1 Kalksteingewinnung für die Gipsproduktion
2 Drehrohröfen in einem Zementwerk
3 Gesamtansicht des Zementwerkes Deuna



1
2
3

Tafel 21 Silikattechnik II

1 Beschickung des Kurztunnelofens in einem Ziegelwerk
2 Tunnelofenwagen mit Langstabisolatoren
3 Abdrehautomat für Langstabisolatoren



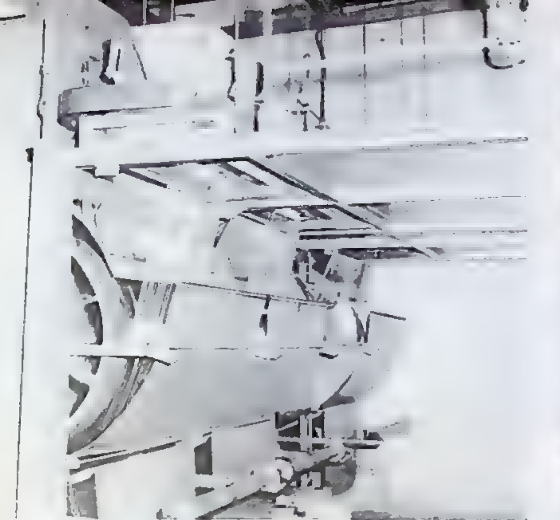


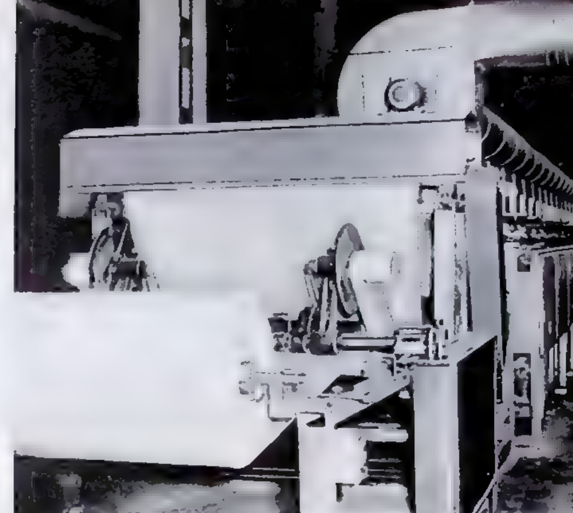


1
2
3

Tafel 22 Silikattechnik III

1 Tellertaktstraße für 800 bis 1 000 Teller je Stunde, Überformen der aus Hubeln (rechts) geschnittenen Scheiben mit Rollermaschinen (*Mitte*)
2 Begießglasurmaschine, *hinten* Auftragsdüse
3 Glasurofen aus Triton-Kaoblock-Bausteinen, *links* Beschickungswagen

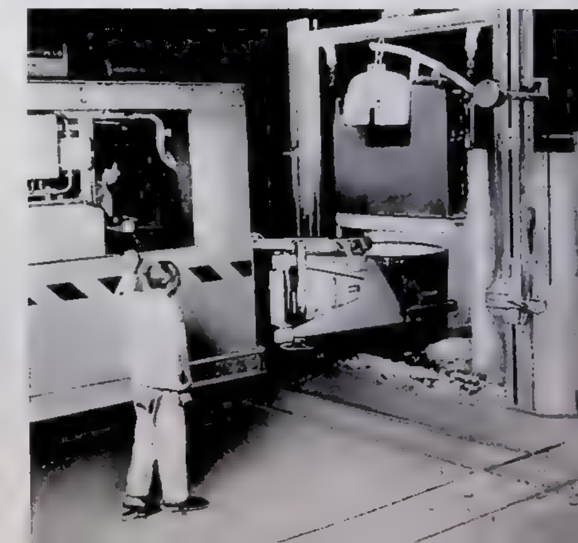


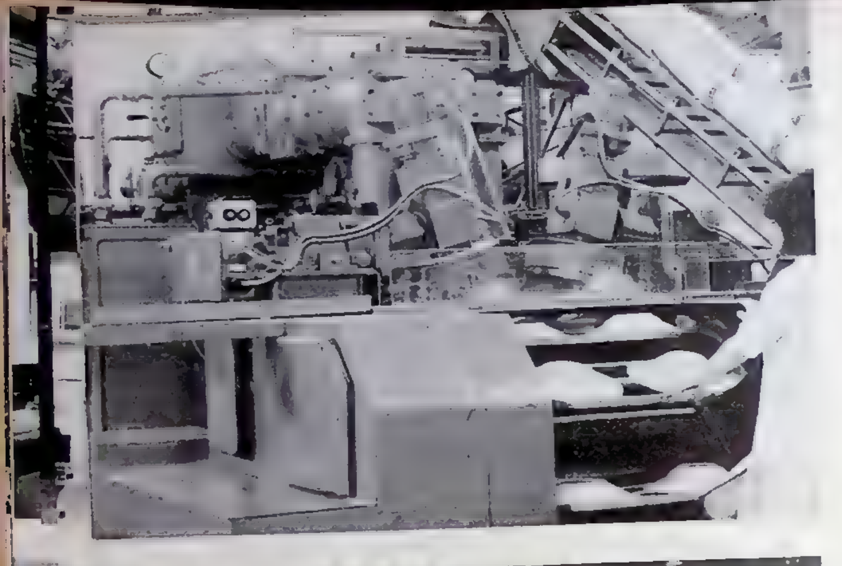


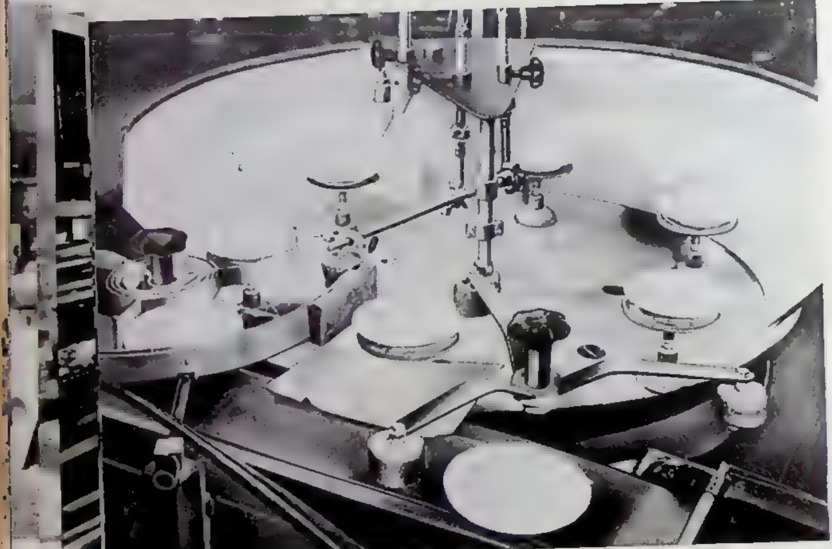
1 2
3
4

Tafel 23 Silikattechnik IV

1 Elektrisch beheizter Düsenspinnofen mit 193 Düsen zum Ziehen von Glasfasern von 18 bis 21 μm Durchmesser aus Glasstabbruch
2 Auslauf von getränktem Glasfaservlies aus dem Trockenkanal, *vorn* Beschneide-und-Aufwickel-Vorrichtung
3 Verschmelzungsmaschine für Rohglaskolben
4 Ausfahren eines Hafens mit schmelzflüssigem optischem Glas aus dem Schmelzofen







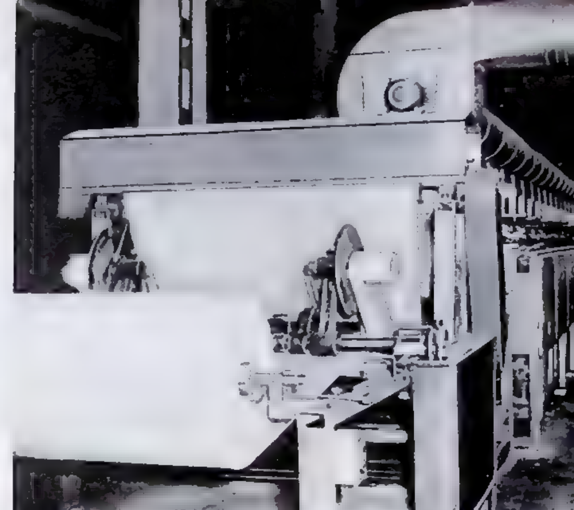


1
2
3

Tafel 22 Silikattechnik III

1 Tellertaktstraße für 800 bis 1000 Teller je Stunde, Überformen der aus Hubeln (rechts) geschnittenen Scheiben mit Rollermaschinen (*Mitte*)
2 Begießglasurmaschine, *hinten* Auftragsdüse
3 Glasurofen aus Triton-Kaoblock-Bausteinen, *links* Beschickungswagen

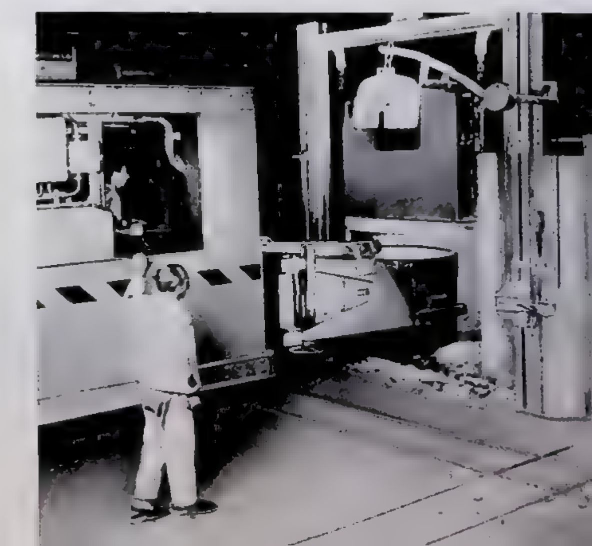




1 2
3
4

Tafel 23 Silikattechnik IV

1 Elektrisch beheizter Düsenspinnofen mit 193 Düsen zum Ziehen von Glasfasern von 18 bis 21 μm Durchmesser aus Glasstabbruch
2 Auslauf von getränktem Glasfaservlies aus dem Trockenkanal, *vorn* Beschneide-und-Aufwickel-Vorrichtung
3 Verschmelzungsmaschine für Rohglaskolben
4 Ausfahren eines Hafens mit schmelzflüssigem optischem Glas aus dem Schmelzofen





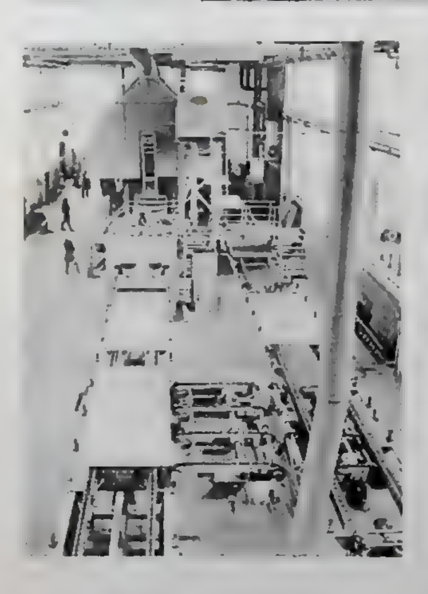
1 6
2 3 7
4 5 8 9

Tafel 24/25
Holztechnik I/II

1 Ortsbewegliche Stammentrindungsmaschine mit Antrieb durch Schlepper (über Zapfwelle), hydraulischer Zuführung der unbearbeiteten (*rechts*) und Stapelvorrichtung für die entrindeten Stämme (*hinten*)
2 Hackschnitzelerzeugung im Wald
3 Maschinelle Baumentastung mit Messer- und Zentrierarmen
4 Vertikal-Sägegatter mit Fernsteuerung zum Auftrennen von Stämmen bis 66 cm Durchmesser in Balken, Bohlen und Bretter
5 Abgelängtes Rundholz wird von einem Ringtrog aus in Flachscheibenzerspaner gegeben, die daraus Späne für Spanplatten herstellen
6 Schleifstraße mit Wendestern in der Spanplattenproduktion
7 Automatischer Doppelendprofiler, der eingelegte Möbelteile in einem Arbeitsgang beidseitig besäumt, Nuten und Falze einfräst, Dübellöcher bohrt, Rundungen einfräst u. a.
8 Anlage zum Flachpressen von Spanplatten; *vorn* gestreute Spanvliese, *hinten* Vor- und Hauptpresse
9 Anlage zum Strangpressen von Spanplatten; *oben* Presse, *darunter* Kühlstrecke, *unten* Trennsäge

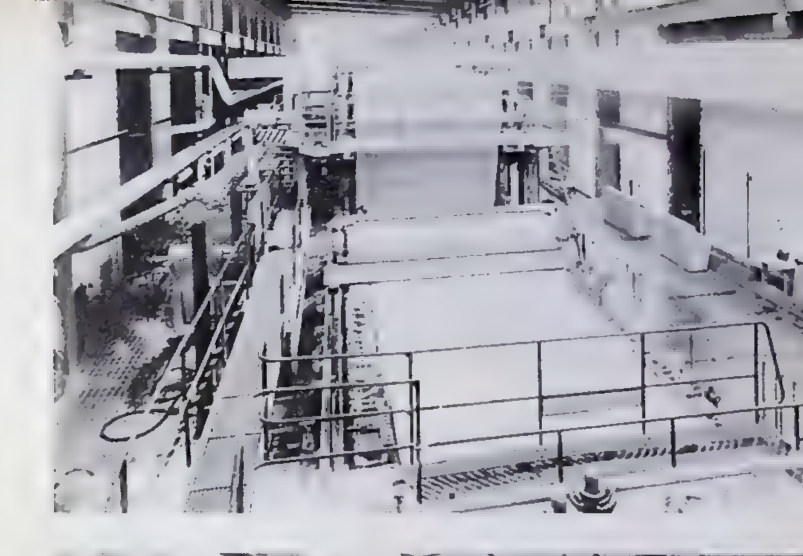


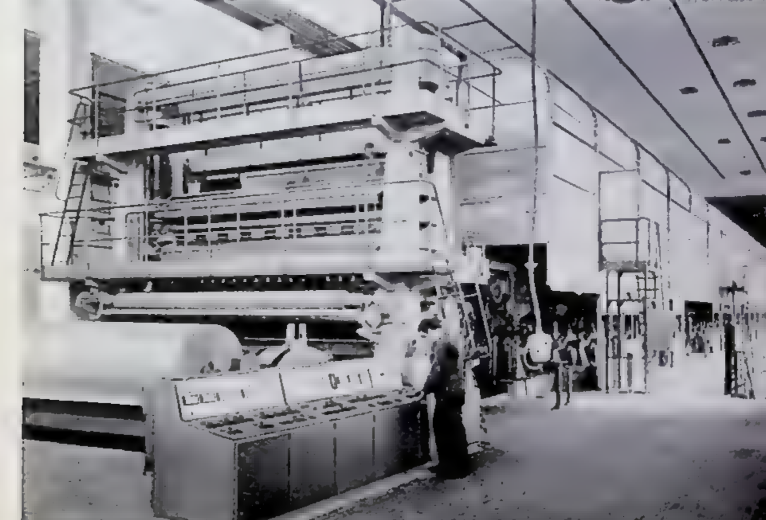


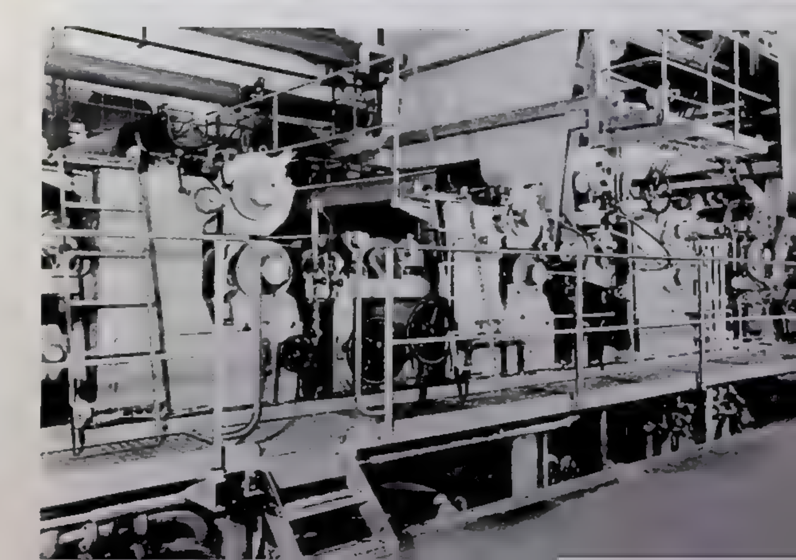








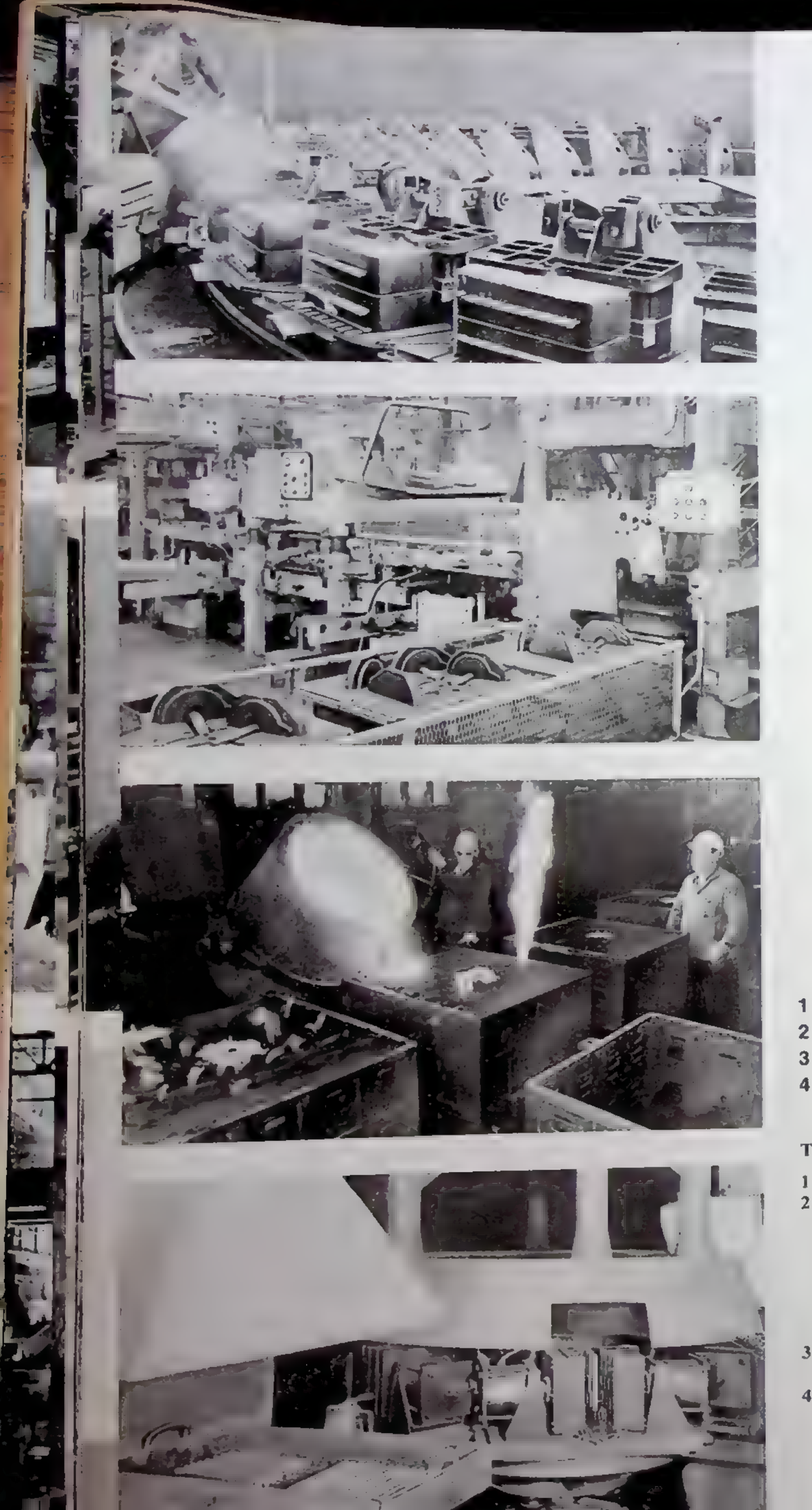




1		5
2		6
3	4	7

Tafel 26/27
Zellstoff- und Papiertechnik I/II

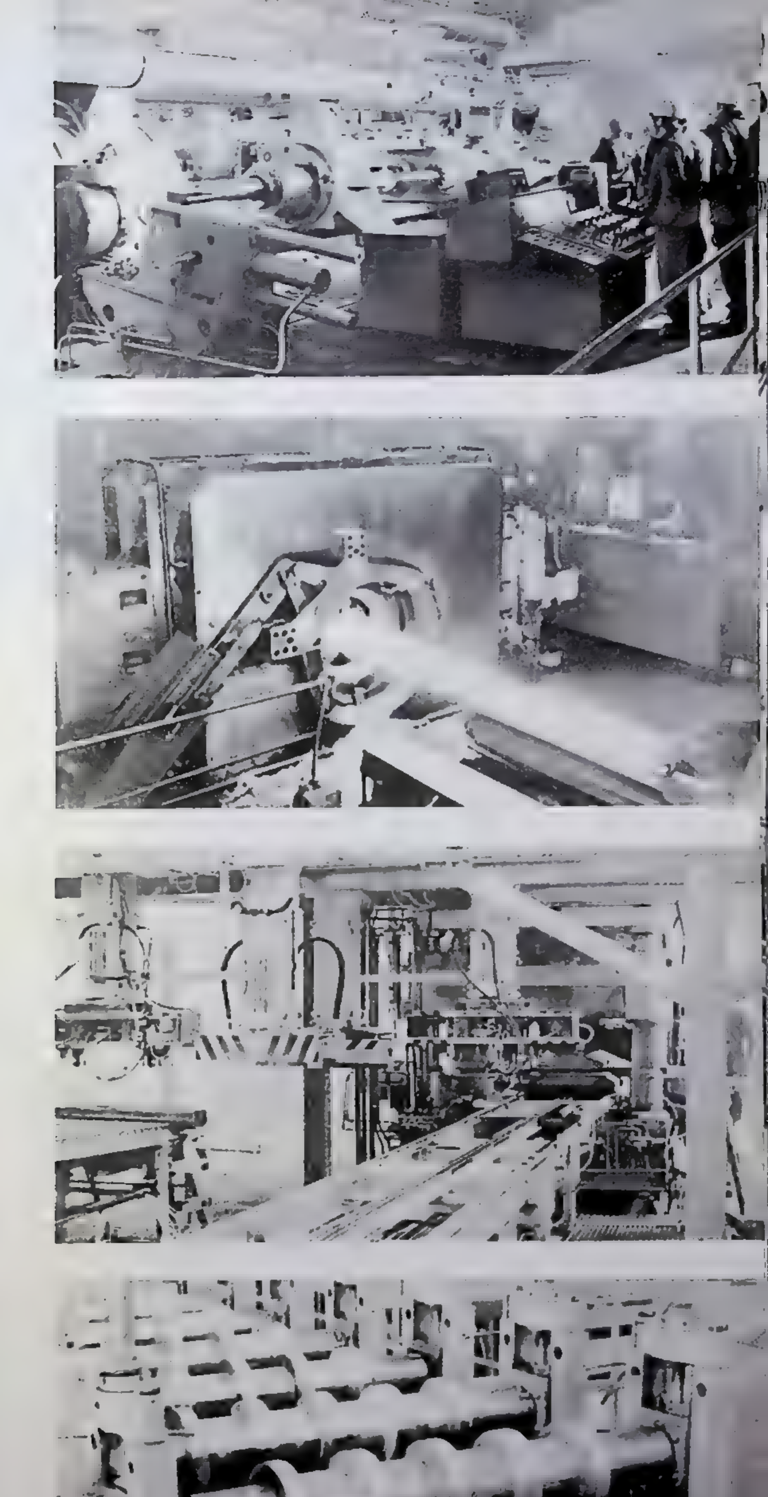
1 Kegelmühlen zur Mahlung des Zellstoffs in Papierfabriken
2 Kontinuierliche Entrindungstrommel zum Entfernen von Rindenresten und Bast
3 Stetigschleifer zur Holzschliffherstellung
4 Turbolöser zur Faserstoffisolierung; Hauptbestandteil ist die rotierende Zerreißscheibe
5 Langsiebpapiermaschine; *vorn* Teil der Siebpartie, *dahinter* Pressenpartie
6 Schlußgruppe einer Kartonmaschine mit Rollenaufwicklung
7 Pressenpartie einer Feinpapiermaschine mit umlaufenden Filzen



1
2
3
4

Tafel 28 Gießen

1 Gießkarussell
2 Automatische Formanlage mit Hochdruck-Preßformmaschinen: im *Vordergrund* Unterkästen mit eingelegten Kernen, die auf einem Schaukelförderer (*oben*) herantransportiert werden
3 Schwerkraft-Formguß mit der Kranpfanne
4 Kernschießmaschine mit Karussell zur Herstellung von Kernen im Hot-Box-Verfahren



1
2
3
4

Tafel 29 Umformen I

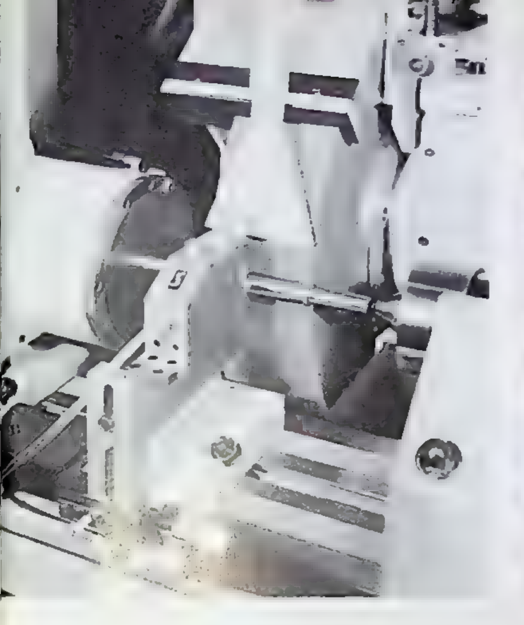
1 30-MN-Presse
2 Langschmiedemaschine zum Schmieden von Profilstahl
3 Anlage zum Explosivumformen von LKW-Achsbrücken
4 Breitbandprofilieranlage

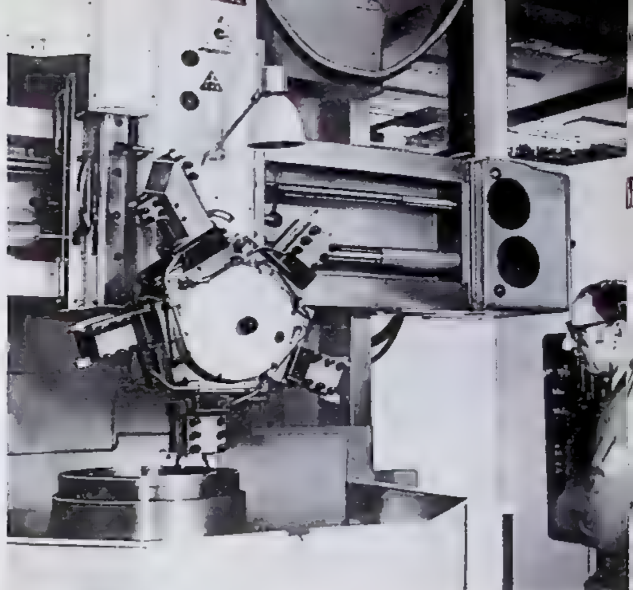


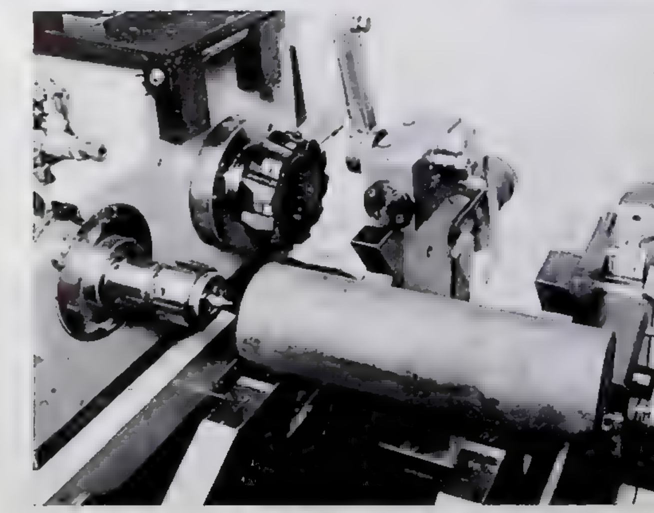
1 2
3
4

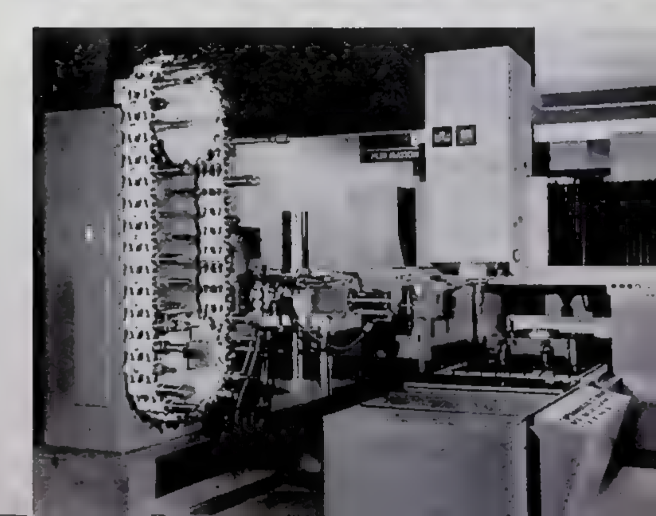
Tafel 30 Umformen II

1 Werkzeugraum einer Profilwalzmaschine zur Herstellung von Gewindespindeln
2 Gesenkschmiede-Kurbelpresse für komplizierte Schmiedeteile; maximaler Druck 25 MPa
3 Stufenumformautomat mit 2 Bandzuführungen für Zieh- und Biegeteile
4 Aufreißdeckelautomat zur Deckelherstellung von Konservendosen





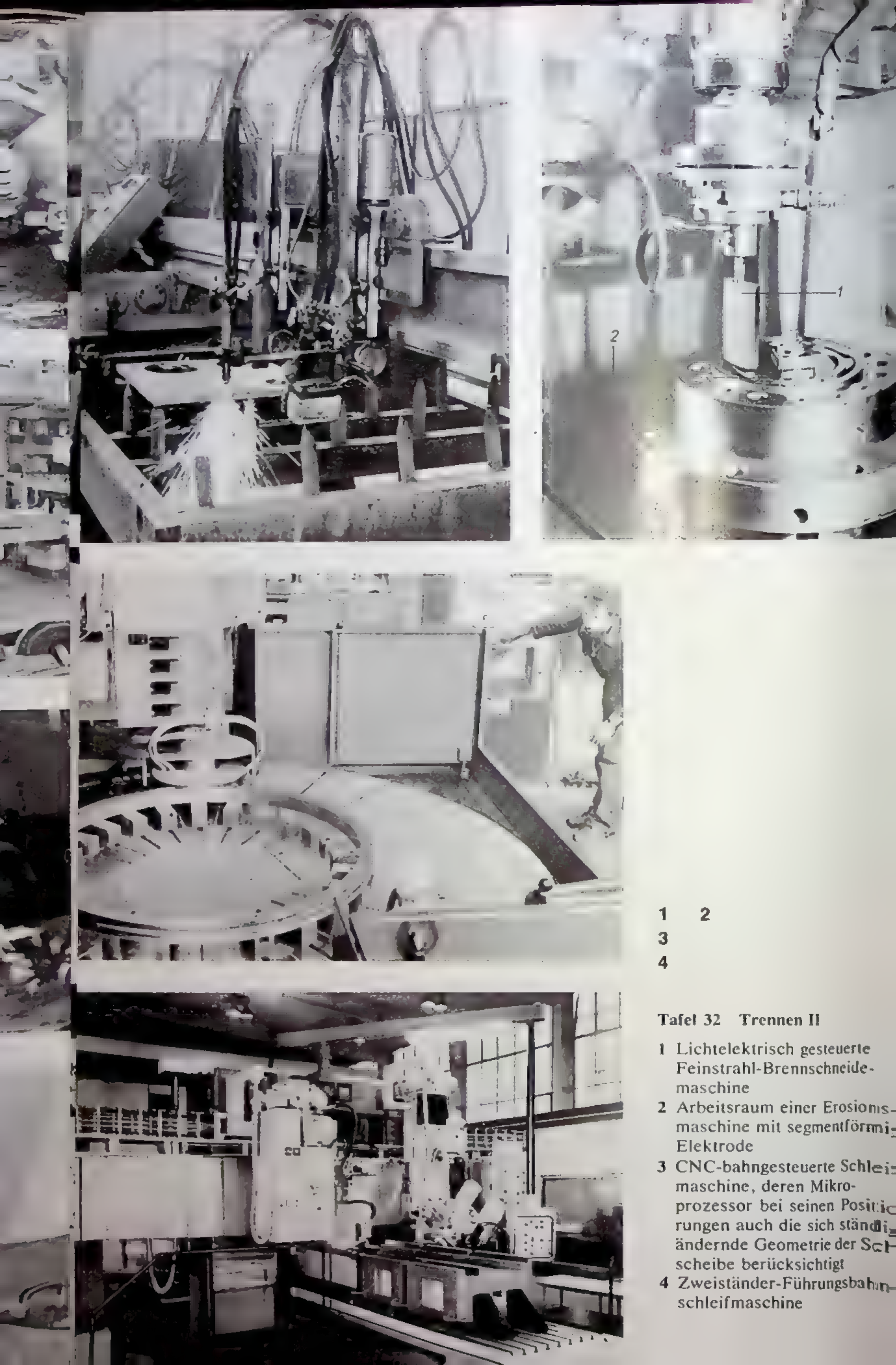




1 2
3
4

Tafel 31 Trennen I

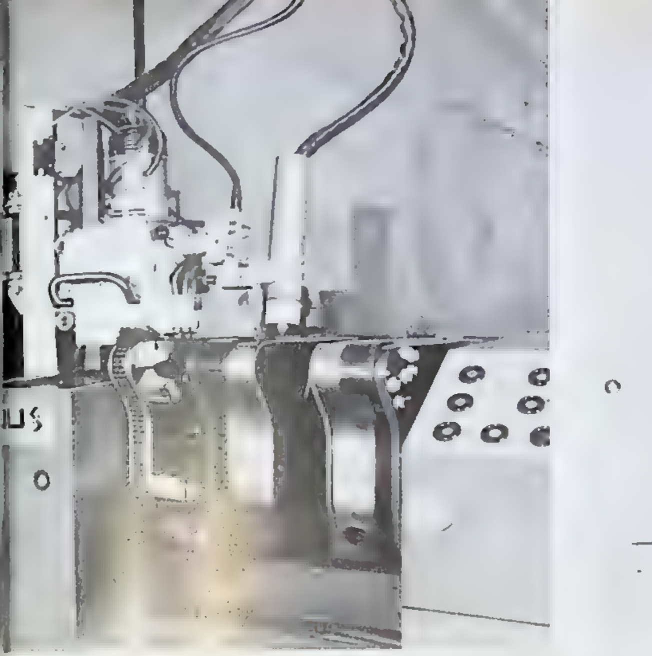
1 Außenrundschleifmaschine mit Meßsteuerung
2 Einständer-Karusselldrehmaschine
3 Endenbearbeitungsmaschine; *links* Bearbeitungseinheit
4 Numerisch gesteuertes Bearbeitungszentrum; *links* Werkzeugspeicher, *Mitte* Manipulator für den automatischen Werkzeugwechsel

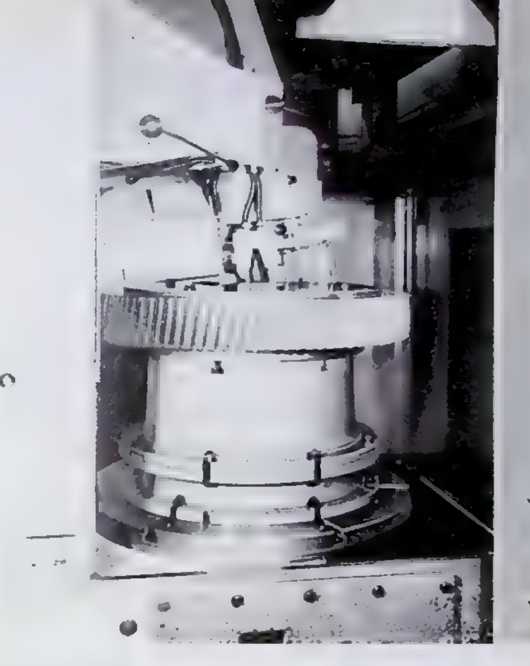


1 2
3
4

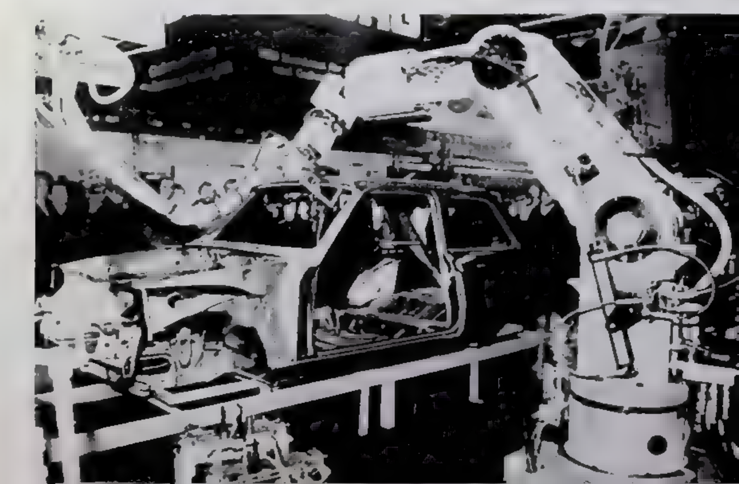
Tafel 32 Trennen II

1 Lichtelektrisch gesteuerte Feinstrahl-Brennschneidemaschine
2 Arbeitsraum einer Erosionsmaschine mit segmentförmi- Elektrode
3 CNC-bahngesteuerte Schlei- maschine, deren Mikroprozessor bei seinen Positio- rungen auch die sich ständi- ändernde Geometrie der Sc- scheibe berücksichtigt
4 Zweiständer-Führungsbahn- schleifmaschine





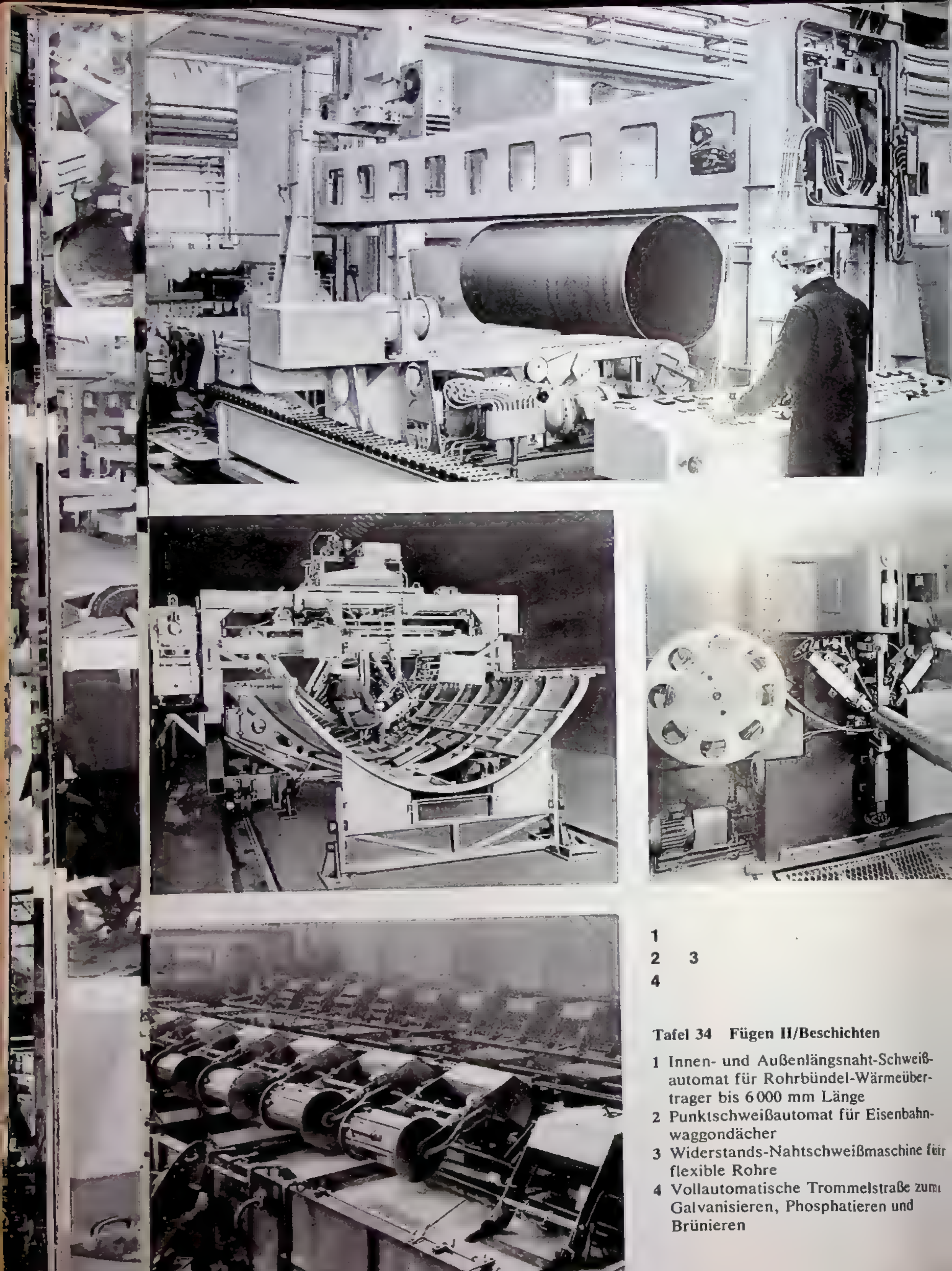




1 2
3
4

Tafel 33 Trennen/Fügen I

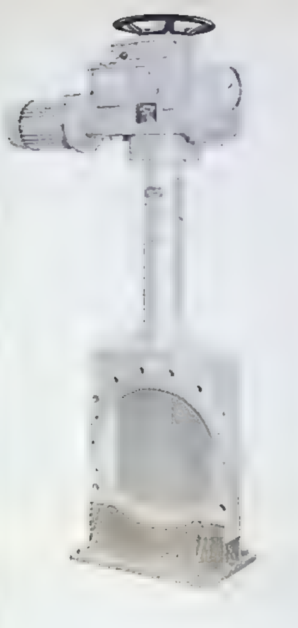
1 Plasmaschweißanlage zum Fügen von Treibstofftanks in der KFZ-Technik; über den Tankteilen ist die nicht abbrennende Elektrode zu sehen
2 Zahnradwälzschleifmaschine
3 Feinstpunktschweißmaschine
4 Industrieroboter als Punktschweißautomat in einer Fließlinie der KFZ-Technik

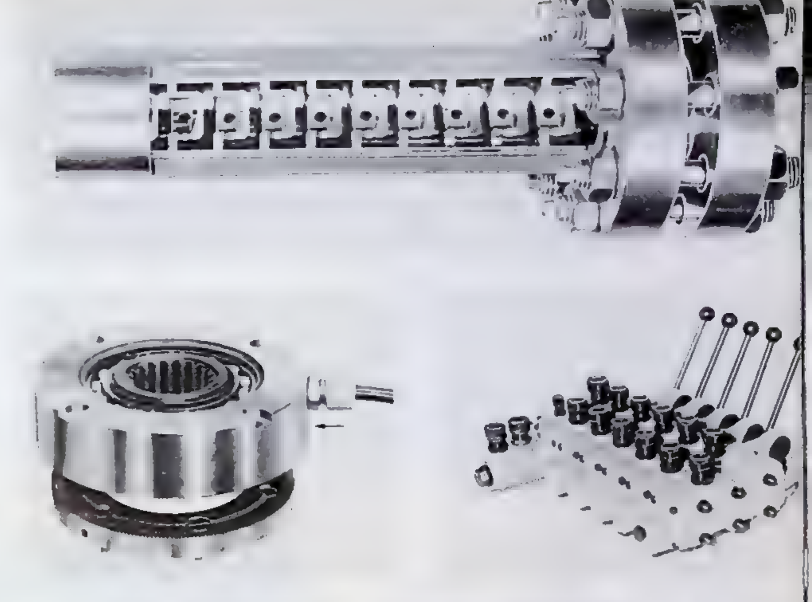


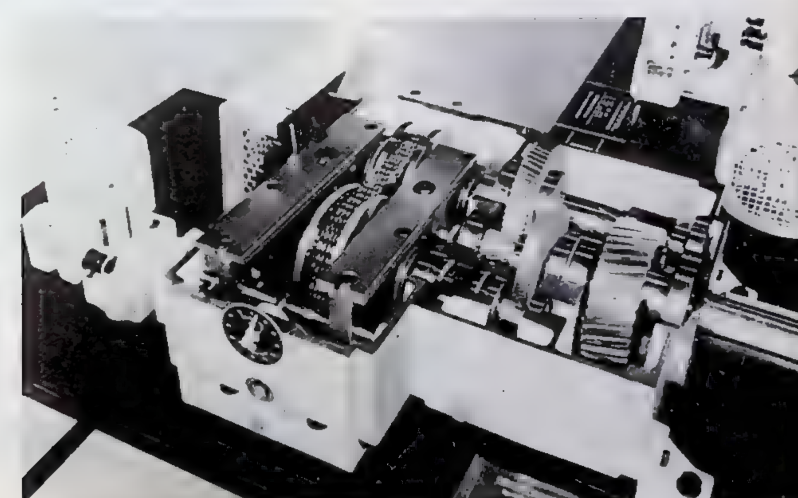
1
2 3
4

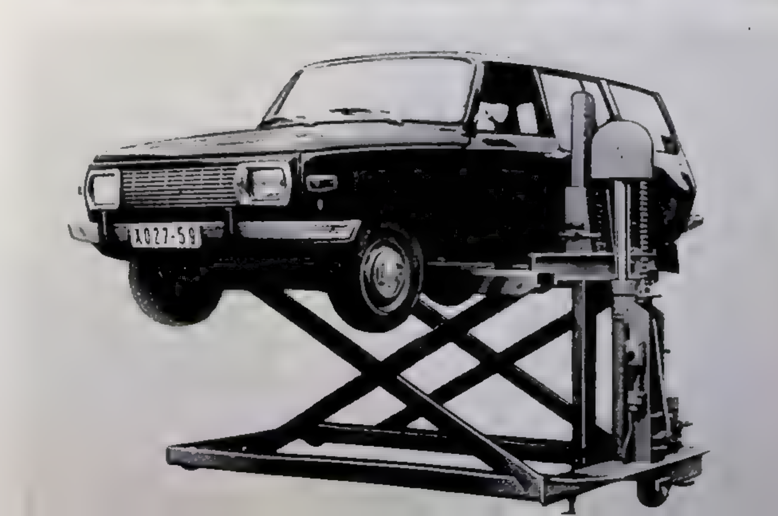
Tafel 34 Fügen II/Beschichten

1 Innen- und Außenlängsnaht-Schweißautomat für Rohrbündel-Wärmeübertrager bis 6000 mm Länge
2 Punktschweißautomat für Eisenbahnwaggondächer
3 Widerstands-Nahtschweißmaschine für flexible Rohre
4 Vollautomatische Trommelstraße zum Galvanisieren, Phosphatieren und Brünieren





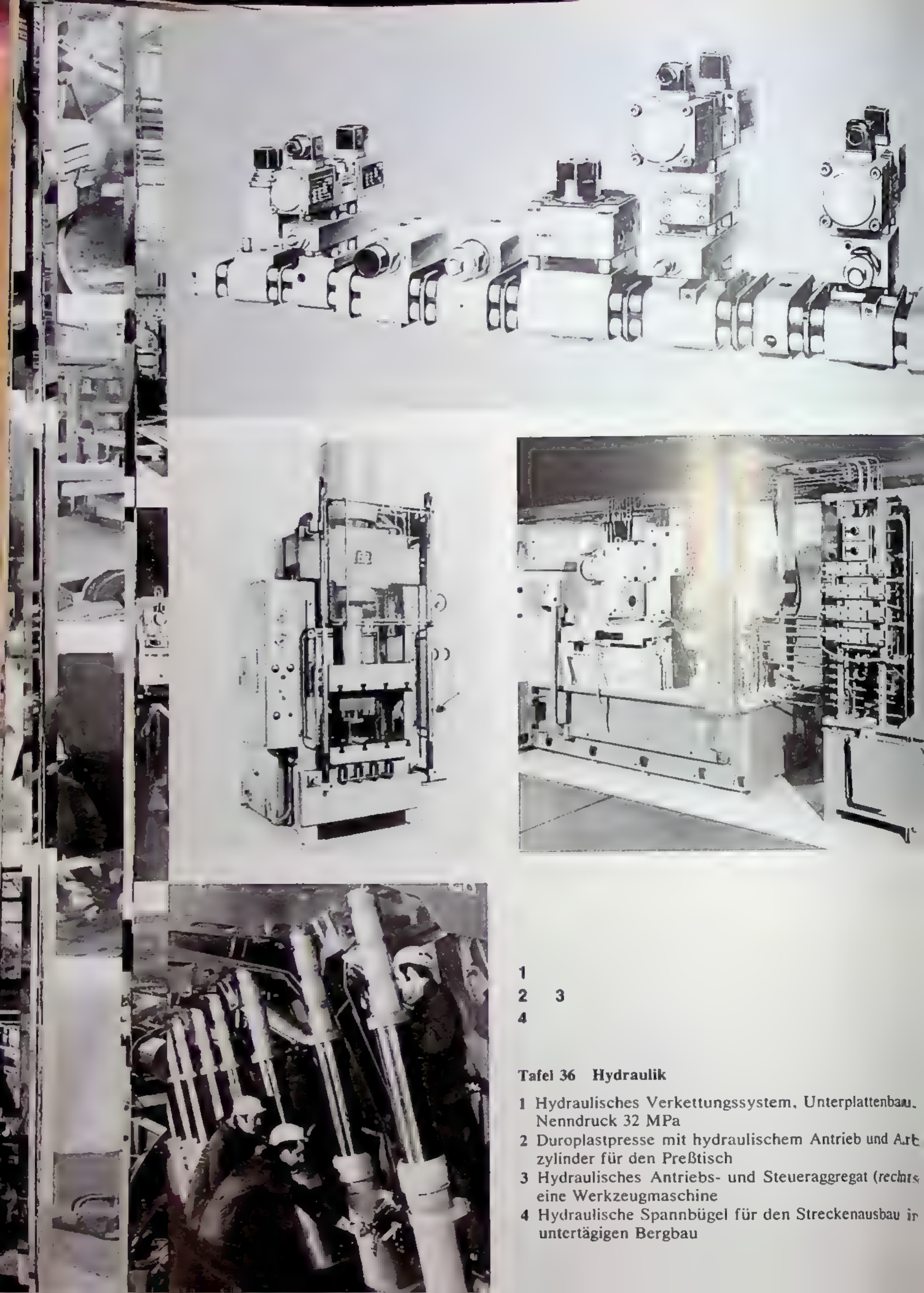




1 2
3 4
5
6

Tafel 35
Maschinenelemente/ Hydraulik

1 Absperrschieber (NW 400) mit Elektro-Stellmotor
2 Hochdruck-Drosselstrecke (NW 50, 25 MPa, geschnitten)
3 Elektromagnetische Zahnkupplung
4 Zu einer Batterie verkettete Hydraulik-Wegeventile
5 Schrägverzahntes Ketten-Stirnradgetriebe
6 Elektrohydraulische Autohebebühne mit einer Hubhöhe von 1 260 mm und einer maximalen Tragfähigkeit von 1,5 t



1
2 3
4

Tafel 36 Hydraulik

1 Hydraulisches Verkettungssystem, Unterplattenbau, Nenndruck 32 MPa
2 Duroplastpresse mit hydraulischem Antrieb und Arb zylinder für den Preßtisch
3 Hydraulisches Antriebs- und Steueraggregat (rechts eine Werkzeugmaschine
4 Hydraulische Spannbügel für den Streckenausbau im untertägigen Bergbau

1
2 3
4

Tafel 37 Fördertechnik I

1 Vollportalkran mit Unterflanschkatze und Katzschleppwerk; Tragkraft 80 kN, Einsatzbreite 32 m
2 Eisenbahndrehkran EDK 750 im Prüffeld; maximale Tragkraft 1,25 MN
3 Autodrehkran ADK 70 bei Montagearbeiten an den Rohrleitungen eines Pumpspeicherwerkes
4 Raupendrehkran RDK 280 beim Einsatz im Wohnungsbau

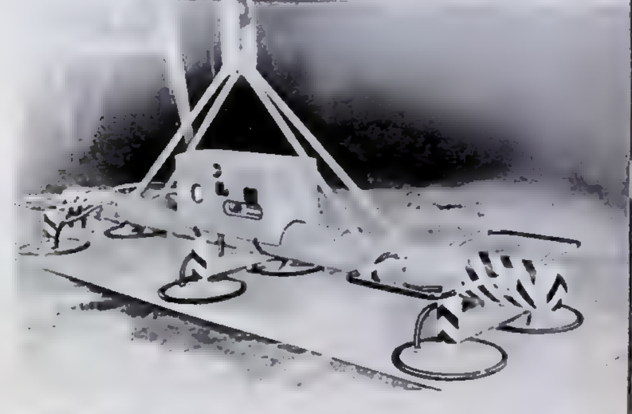


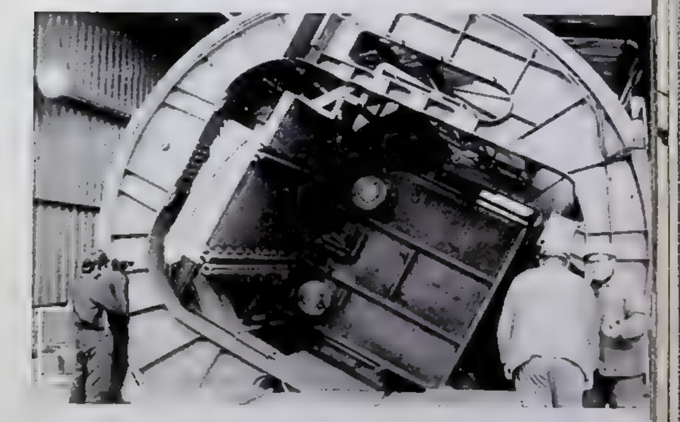


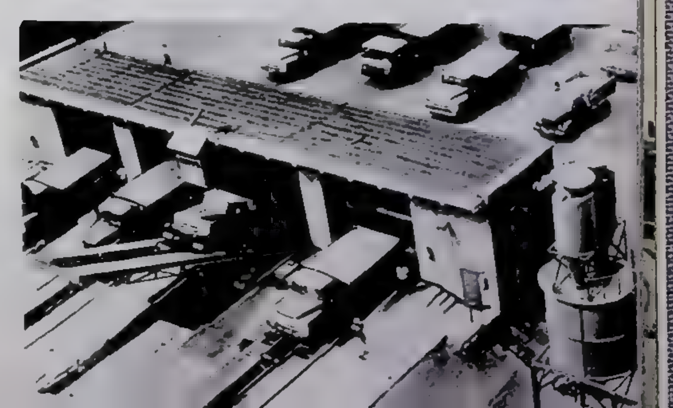
1 2
3
4
5

Tafel 38 Fördertechnik II

1 Absetzen des Unterwagens mit Raupenfahrwerk eines Universalbaggers auf einen Taktwagen in der Endmontage
2 Löffelbagger mit hydraulisch gesteuertem Ausleger und Löffel
3 Universalbagger UB 14-12 in der Montage
4 Ferngesteuerter Eingefäßnaßbagger im Flußbau
5 Eingefäß-Elektrobagger beim Laden von Haufwerk in einem Steinbruch







1
2
3
4

Tafel 39 Fördertechnik III

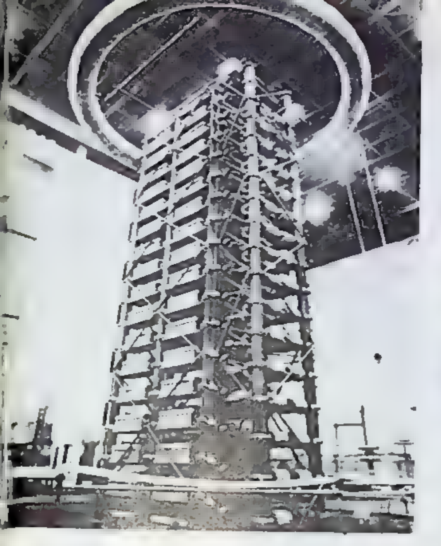
1 Transport von Haufwerk aus einem Steinbruch zum Brecher mit Hilfe einer Standseilbahn
2 Vakuumlasthaftgerät
3 Kreiselkipper zum Entladen von Eisenbahnwaggons mit einer Entladekapazität von 20 Waggons/h
4 Pneumatische Kippeinrichtung zum Entleeren von LKW mit einer Entladekapazität von 800 LKW/24 h

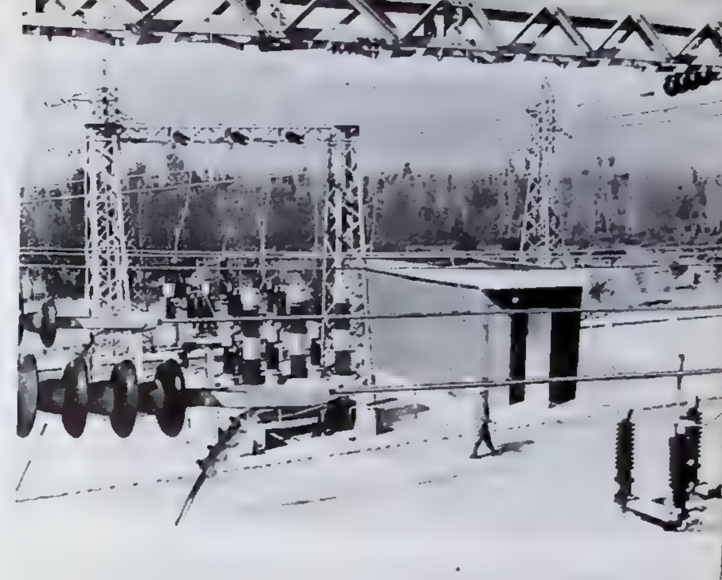


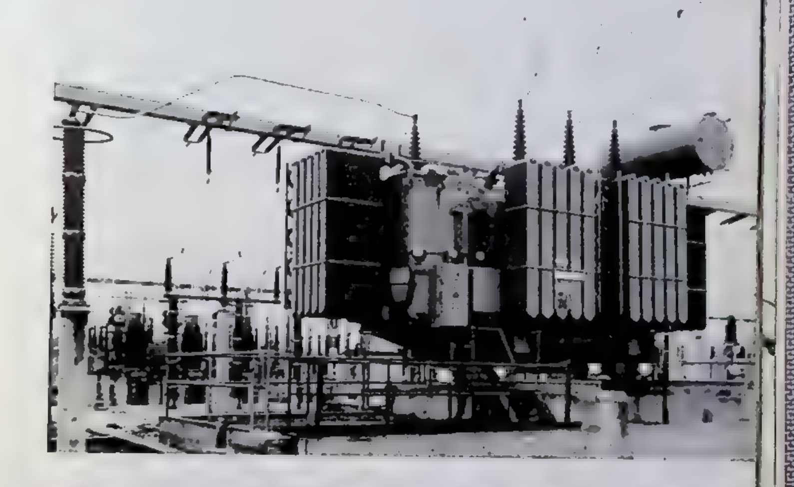
1 2
3
4

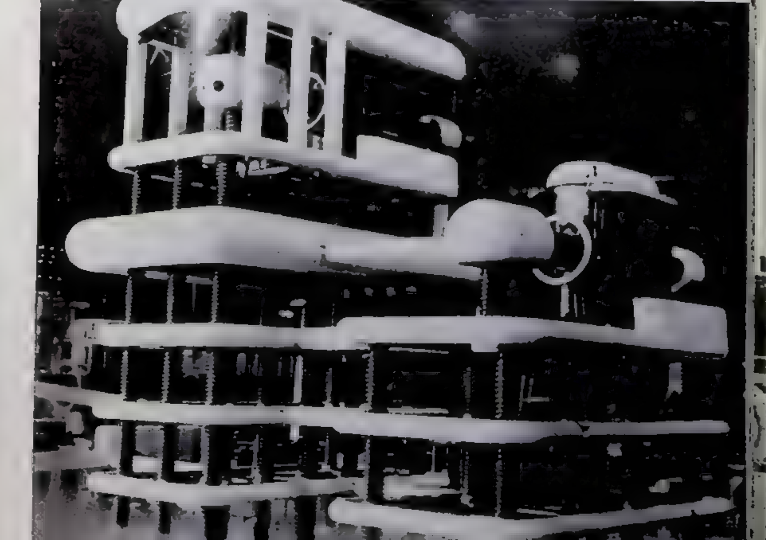
Tafel 40 Fördertechnik IV

1 Kreisförderer in einer Spinnere
2 Regalbedienungsgerät in einem 8 m hohen Regal
3 Frontschaufellader mit Knicklenkung
4 Portalhubwagen vor dem Aufnehmen eines Containers









1 2
3
4

Tafel 41 Elektrotechnik I

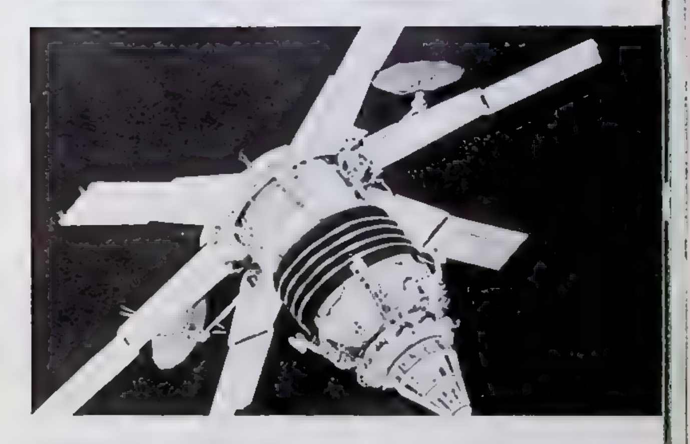
1 Impulsspannungsprüfgenerator mit einer Summenladespannung von 5 Mio V und einer Ladeenergie von 800 kJ
2 66-kV-Freiluftschaltanlage
3 40-MVA-Leistungstransformator
4 Transformatorenkaskade für 2,25 MV zur Überprüfung neuartiger Werkstoffe oder konstruktiver Lösungen von Isolatoren, Schaltern und Masten auf ihre Spannungsfestigkeit

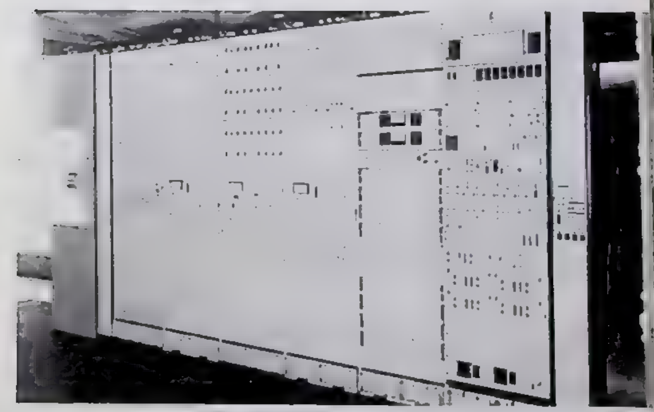


1
3 2
4
5

Tafel 42 Elektrotechnik II/Nachrichtentechnik I

1 Linearmotorantrieb (*links*) an einer Plasmaschweißmaschine
2 Fertigung eines Generatorrotors für das Pumpspeicherwerk Markersbach
3 Vorschubmotor (Gleichstrom-Servomotor) mit Riementrieb an einer Werkzeugmaschine
4 Verseilen von Fernmeldeortskabeln
5 Verdrahtungsprüfautomat mit Nadeladapter für 12 000 Anschlußpunkte zum Prüfen von Baugruppenrahmen für elektronische Wählsysteme

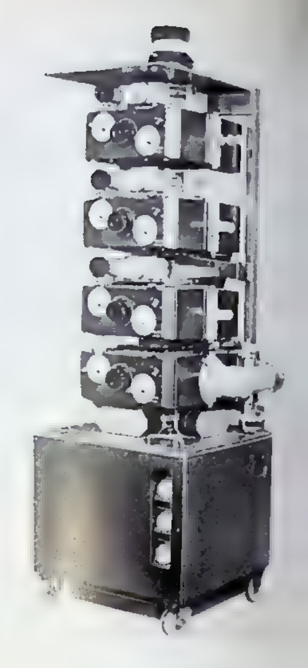




1
2
3
4

Tafel 43 Nachrichtentechnik II

1 Modell eines Intelsat IV A-Nachrichtensatelliten, *rechts* Richtantennen, links Düse des Bahnkorrekturtriebwerks
2 Modell des Nachrichtensatelliten Molnija-1 mit sternförmig angeordneten Solarzellenauslegern und 2 parabolförmigen Richtantennen
3 Gestellreihe einer Trägerfrequenzübertragungseinrichtung
4 Gestellreihe einer Fernsprechvermittlungseinrichtung mit 4 Koordinatenschaltern je Gestell

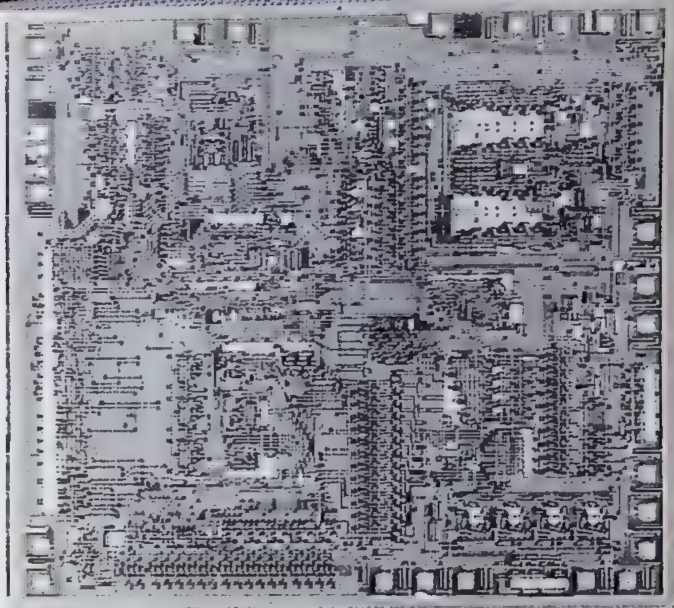


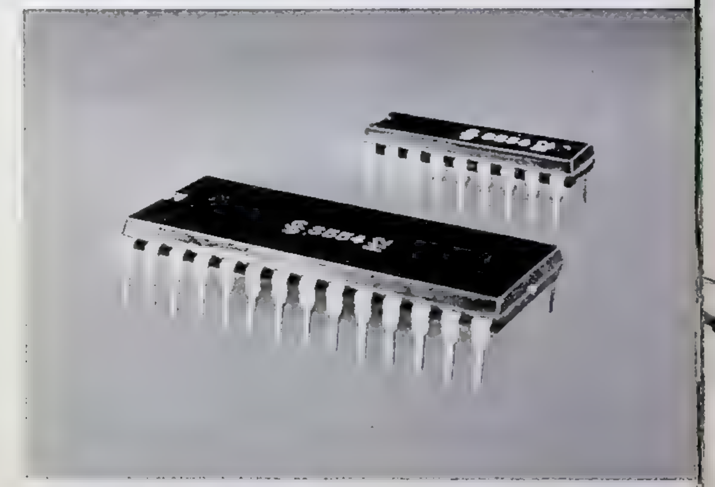
1 2
3
4

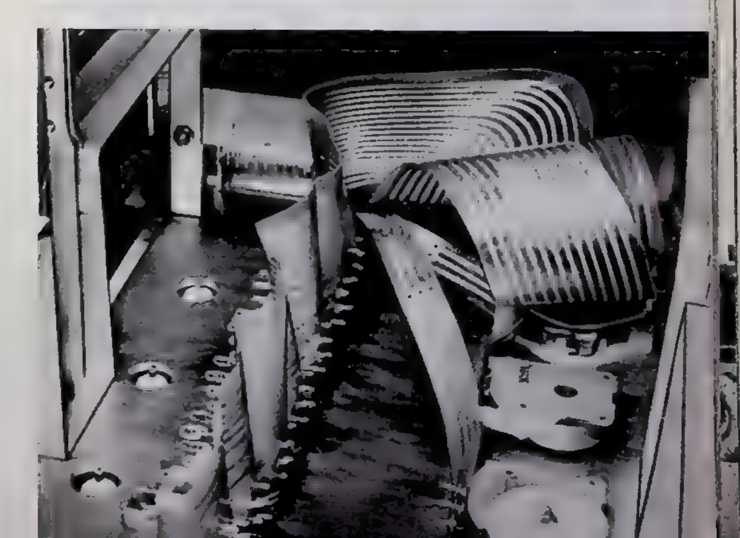
Tafel 44 Elektronik I

1 Thyristorstromrichter
2 Luftgekühltes Leistungsklystron für 22 kW als Endstufenröhre von UHF-Fernsehsendern
3 Abzweig zum Auskoppeln von Licht aus einem Glasfaser-Lichtleiter (rasterelektronenmikroskopische Aufnahme); die Verzweigungsstrukturen werden in einer modifizierten planaren Dickfilmtechnik hergestellt
4 Herstellung von integrierten Schaltkreisen. Die 1,6 mm × 2 mm großen Chips befinden sich in den Fensteröffnungen eines Polyamidbandes, das mit Kupfer beschichtet, verzinnt und so geätzt ist, daß Leiterbahnen und Anschlußpunkte entstehen









1 2
3
4

Tafel 45 Elektronik II

1 Platine eines Mikrocomputers
2 MOS-Schaltkreis
3 Gekapselte MOS-Schaltungen
4 Flexible gedruckte Leitungen für die Verdrahtung von Potentiometern im Gerät

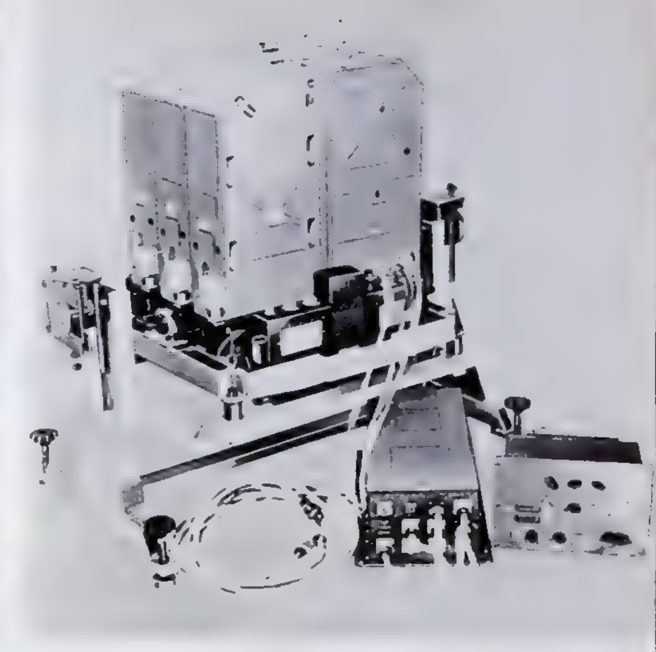


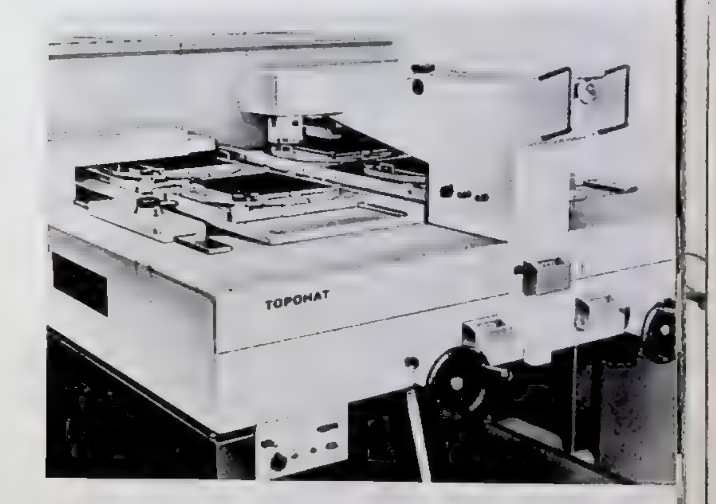
1 2
3
4

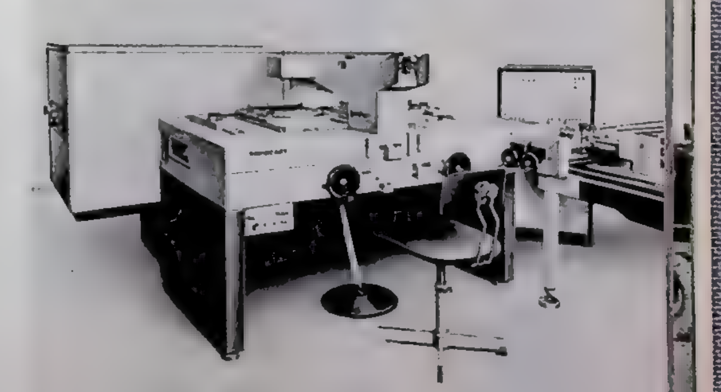
Tafel 46 Feinmechanik-Optik I

1 Schulfernrohr „TELEMENTOR 2“
2 Elektrooptisches Tachymeter zur schnellen Ermittlung der Lage und Höhe eines Geländepunkts
3 Meßmikroskop für Messungen im Lichtschnittverfahren
4 Fotomikroskop „DOCUVAL“







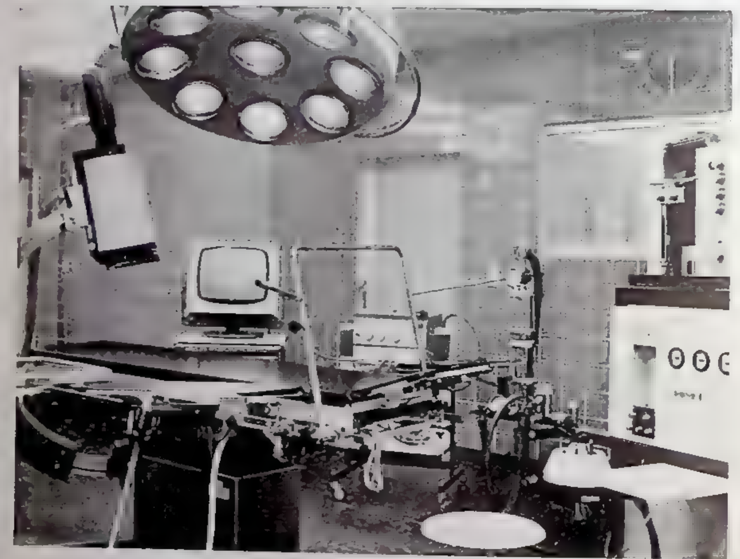


1 2
3
4

Tafel 47 Feinmechanik-Optik II

1 2-m-Spiegelteleskop für Beobachtungen im Primär-, Cassegrain- und Coudéfokus
2 Multispektralkamera MKF-6, die zur Ermittlung geophysikalischer Meßergebnisse bei sowjetischen Raumflugunternehmen eingesetzt wurde
3 Vollautomatisches fotogrammetrisches Auswertesystem „TOPOMAT"
4 Stereokartiergerät „TOPOCART" mit Differentialentzerrungsgerät „ORTHOPHOT"







1
2
3

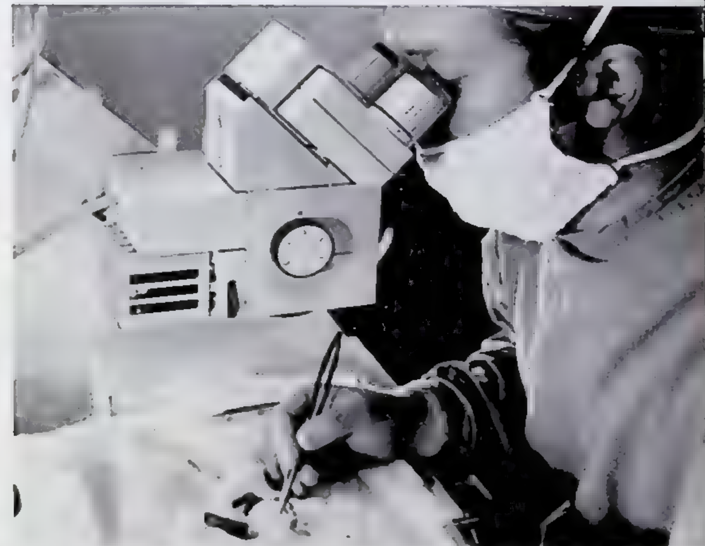
Tafel 48 Medizintechnik I

1 Laborstrecke
2 Vollklimatisierter OP-Saal mit Röntgengerät und Fernsehmonitor, Universalabsauggerät und OP-Lampe
3 Linearbeschleuniger zur Geschwulstbekämpfung









1 2
3 4

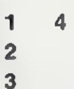
Tafel 49 Medizintechnik II

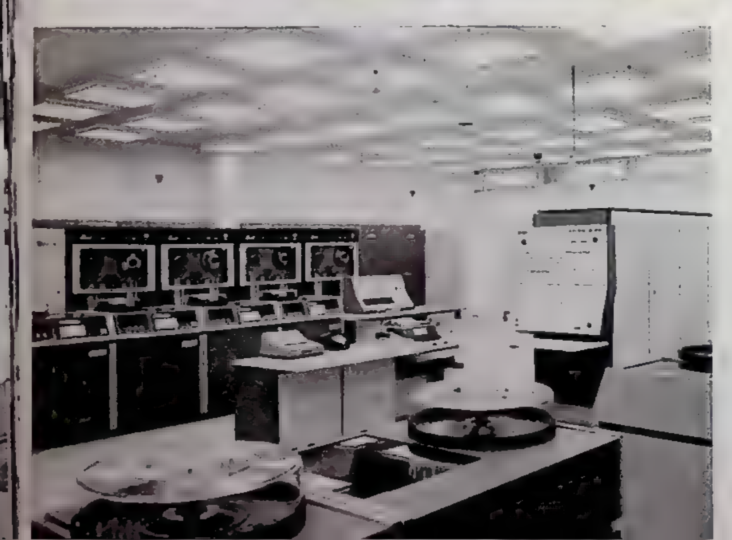
1 Ganzkörper-Computertomograf „Somatom" zur Röntgendiagnostik
2 Dentaleinheit „Probaset"
3 Netzhautkamera „Retinophot"
4 Operationsmikroskop





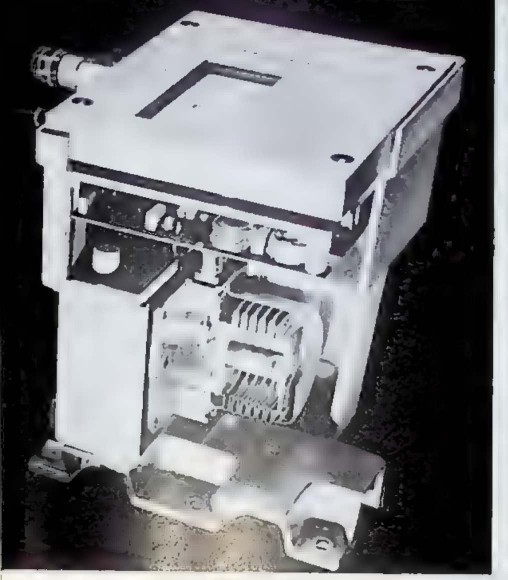


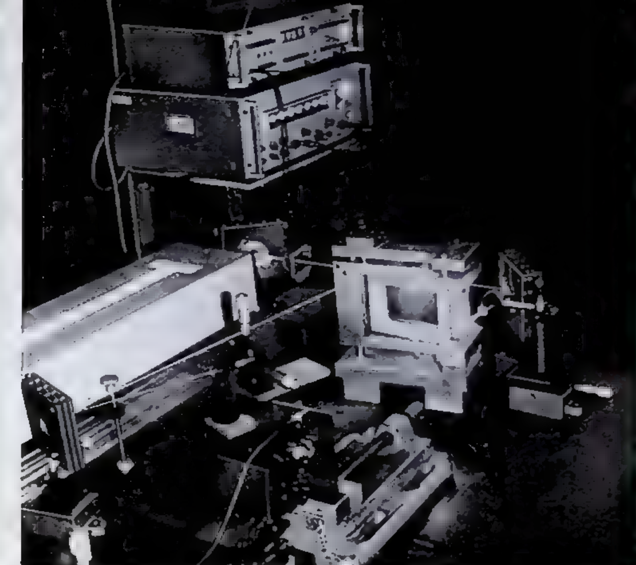


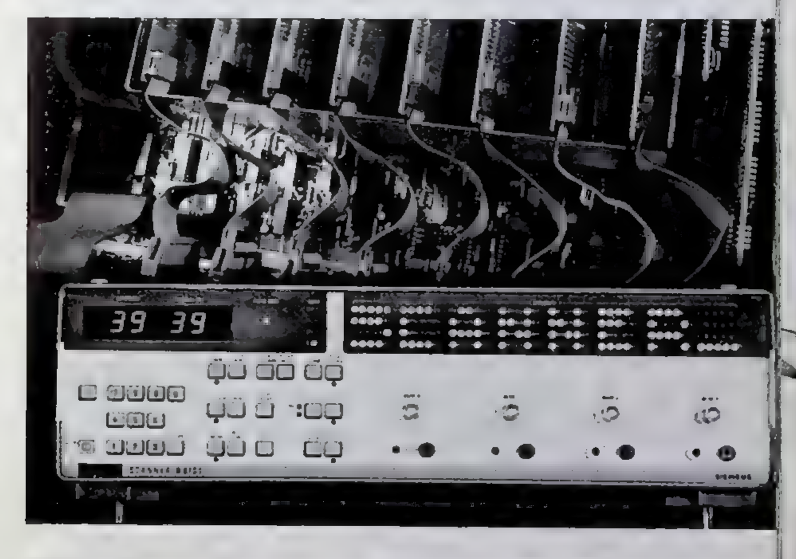


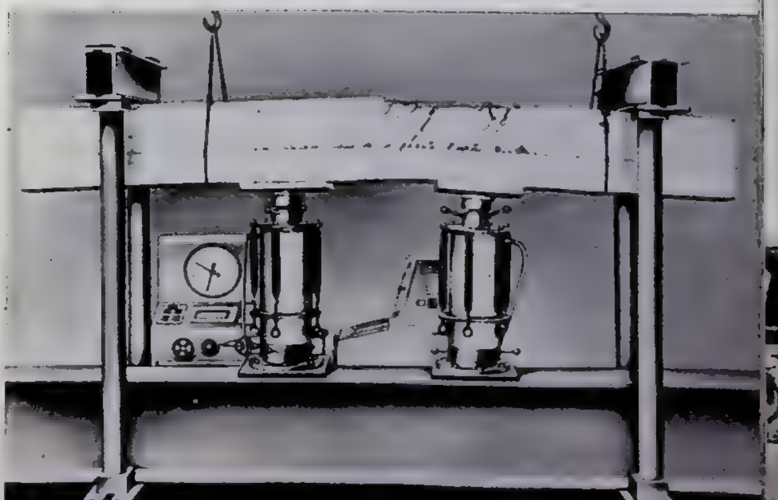
Tafel 50
Rechen- und Datenverarbeitungstechnik I

1 Bildschirmgerät mit alphanumerischer Eingabetastatur und Lichtstift zum manuellen Positionieren
2 Kleinrechensystem Robotron 4201; *hinten* Lochbandein- und -ausgabegeräte, *links* Schreibmaschine als Bedieneinheit, *vorn* Paralleldrucker, *rechts hinten* Magnetbandspeicher
3 EDVA Robotron EC 1040; *hinten* Magnetbandspeicher, *davor* Wechselplattenspeicher, *rechts* Zentraleinheit mit Hauptspeicher; *vorn* Wechselplattenspeicher
4 Auswechselbarer Kugelkopf einer Kugelkopfschreibmaschine





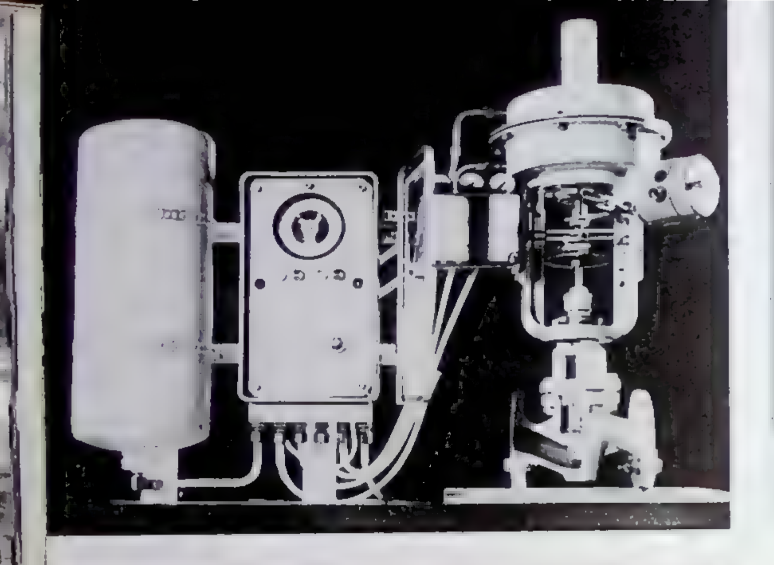




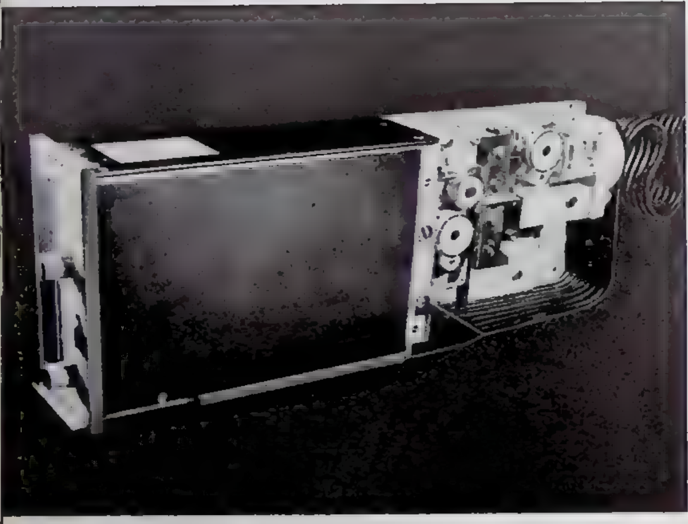


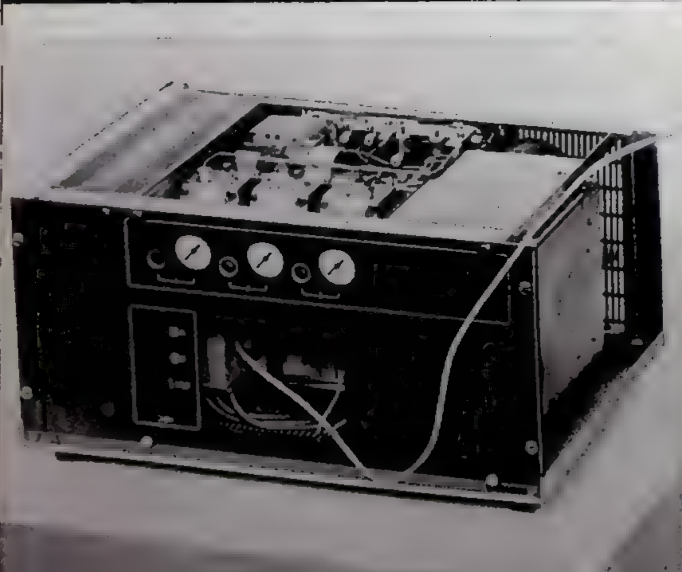
Tafel 51
Meß- und Prüftechnik

1 Elektrischer Meßumformer zur Druck- und Durchflußmessung von gasförmigen oder flüssigen Medien
2 Anordnung zur holografischen Einmessung piezoelektrischer Schwingungsaufnehmer mit Laserstrahlen
3 Mikroprozessorgesteuertes Relais-Koppelfeld mit frei programmierbarer, unabhängiger Ablaufsteuerung als Schaltglied zwischen Meßgebern, Prüflingen, Meß- und Registriergeräten
4 Biegeversuch an einem Betonbalken mittels hydraulischer Prüfzylinder







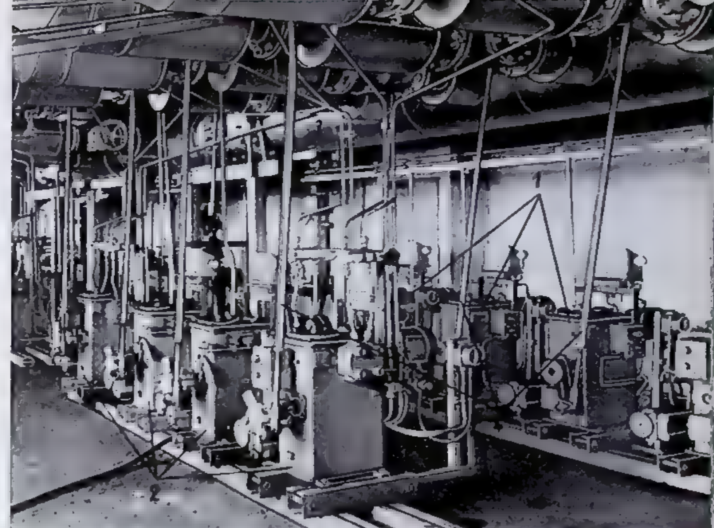


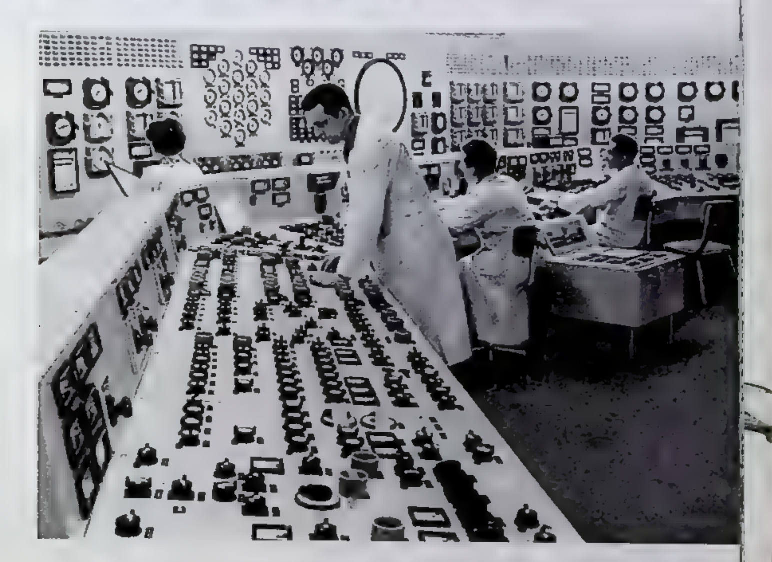
1 2
3
4

Tafel 52
Automatisierungstechnik I

1 Pneumatische Sicherheitsautomatik, mit der das Stellglied eines pneumatischen Stellgeräts bei Druckausfall oder Unterschreiten des Solldrucks in eine Sicherheitsstellung gebracht wird
2 Schnittmodell eines Stellventils mit pneumatischem Antrieb
3 Regelstation eines pneumatischen Regelsystems
4 Mikroprozessorgesteuerter Prozeßchromatograf für Produktionsanlagen der chemischen Industrie zum Analysieren von Gasen und unzersetzt verdampfbaren Flüssigkeiten





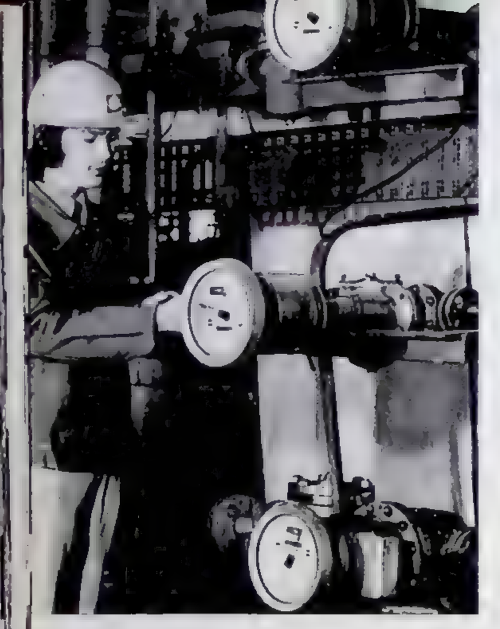




1 2
3
4

Tafel 53
Automatisierungstechnik II

1 Dreiwegeventile (*1*) mit Stellmotoren (*2*) einer Klimaanlage
2 Reglerblöcke zur Durchfluß- (*1*) und Korrekturregelung (*2*) für Vergasungsgemisch, das von 4 Generatoren einer Sammelleitung (*3*) zugeführt wird; Gestänge zu den Stellorganen (*4*), Meßblende (*5*)
3 Blockschaltwarte des Kernkraftwerks Rheinsberg
4 Stellventile (*1*) und Druckregler (*2*) in einer Rohrleitung









1	2
3	4

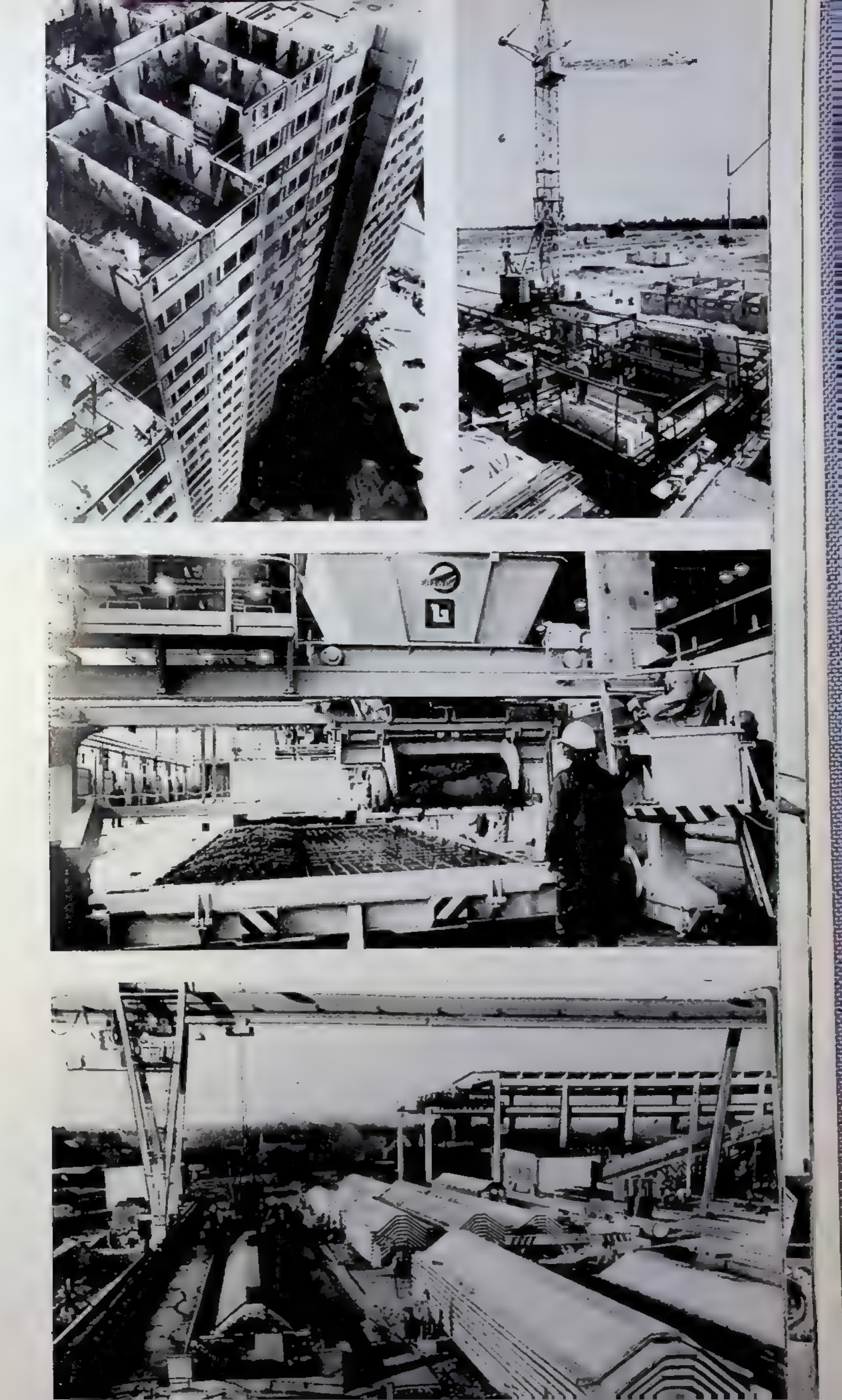
Tafel 54 Automatisierungstechnik III

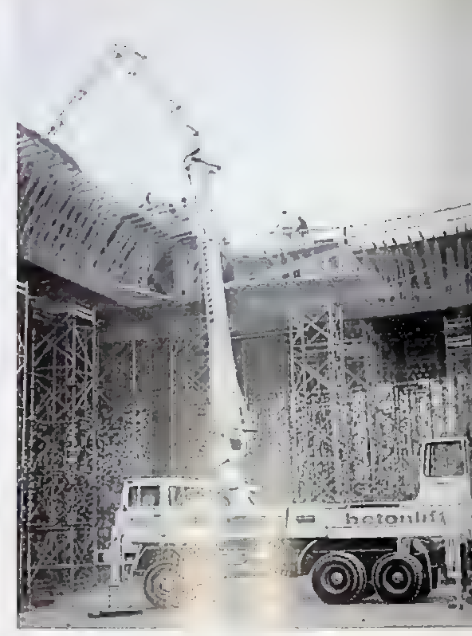
1 Einsatz von Wälzkolben-Durchflußmessern in einem Chemiefaserwerk
2 Relaisraum der Meßwarte eines Betriebes zur Benzinraffination
3 Kapazitiv arbeitende Grenzschalter zur Kontrolle der Füllhöhe eines Bandförderers
4 Ultraschallschranken zur Kantensteuerung des Filtertuchs eines Drehfilters (Zweipunktregelung)

1	2
3	
4	

Tafel 55 Bautechnik I

1 Wohnhochhäuser in Plattenbauweise
2 Anlieferung von Betonelementen für den Wohnungsbau und Versetzen der Elemente mit einem Turmdrehkran (Fachwerkkonstruktion)
3 Deckenelementefertigung in einem Plattenwerk; *links* mit bereits aufgebrachtem Beton, *rechts* ist noch die Armierung zu sehen
4 Fertigungsanlage für VT-Faltelemente mit Portalkran

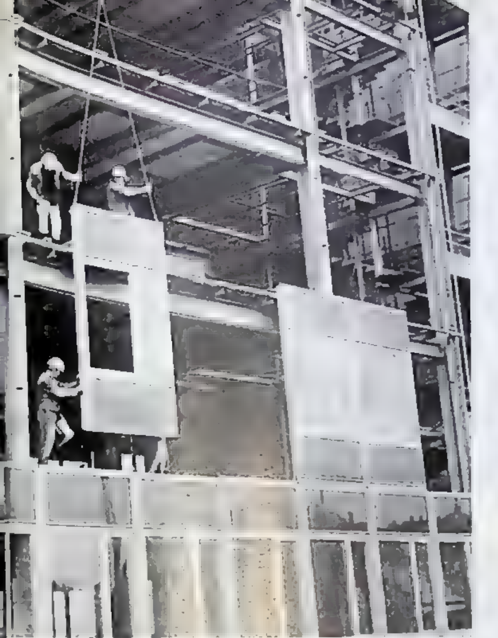




1 2
3
4

Tafel 56 Bautechnik II

1 In Gleitschalungsbauweise errichtete Kühltürme eines Wärmekraftwerks
2 Einbringen von Pumpbeton mit einer Fahrzeug-Betonpumpe
3 Dachkonstruktion als HP-Schale
4 Wand- und Dachelemente einer Sporthalle aus HP-Schalen





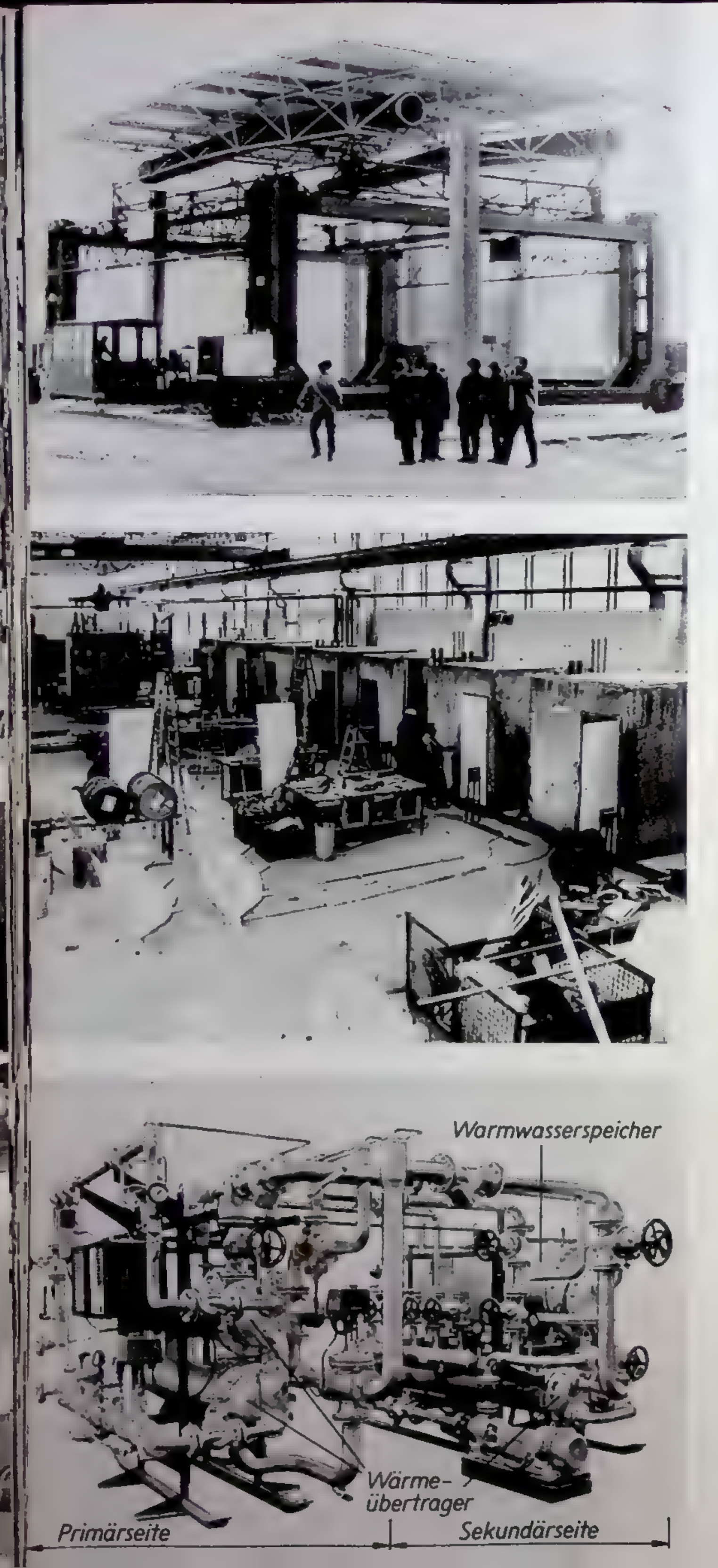


1 2
3
4

Tafel 57 Bautechnik III

1 Montage von nichttragenden Fassadenelementen
2 Stahlskelettbauweise für ein mehrgeschossiges Gebäude
3 Stahltragwerk einer Halle; Stützen in Hülsenfundamente eingespannt, Binder mit Dübeln für pfettenloses Verbunddach
4 Schrägseilbrücke mit einem Pylon über die Donau bei Bratislava





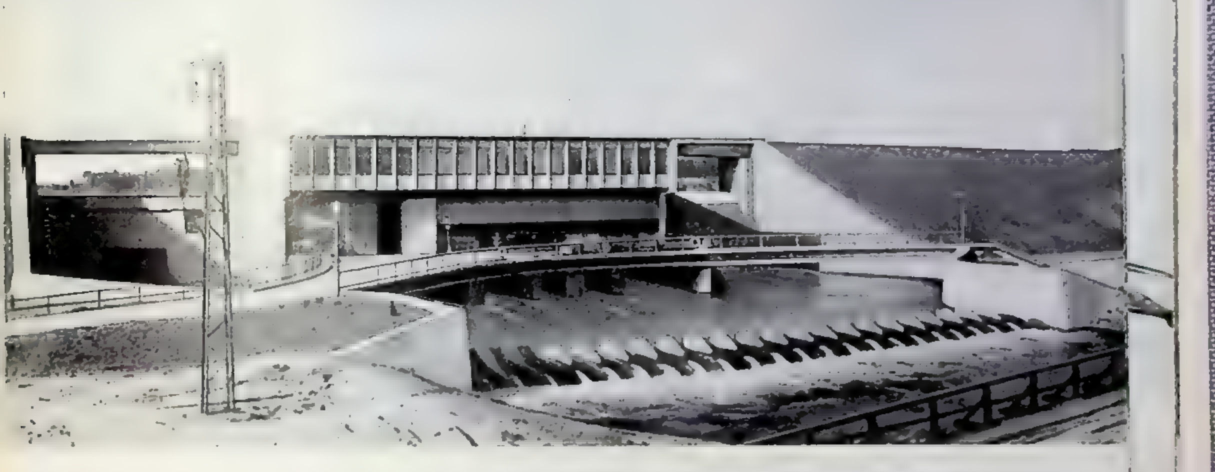
1
2
3

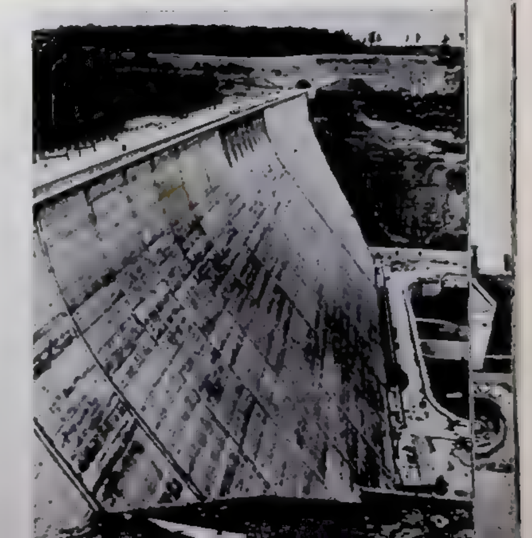
Tafel 58 Bautechnik IV

1 Montage vorgefertigter großflächiger Dachelemente
2 Fließfertigung von Sanitärraumzellen für den industriellen Wohnungsbau
3 Stationär vorgefertigte Anschlußstationen für die Wärmeversorgung









1 2
3
4

Tafel 59 Bautechnik V

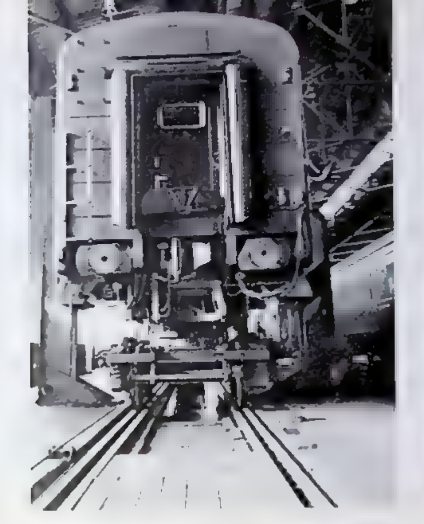
1 Schiffschleuse im Wolga-Ostsee-Kanal
2 Aufbringen und Festwalzen einer wasserundurchlässigen Bitumenschicht auf einem Steinschüttdamm
3 Die Spree-Talsperre Bräsinchen ist ein Erddamm von 3,7 km Länge, kann 42,6 Mio m^3 Wasser stauen, schützt so den Spreewald vor Hochwasser und versorgt die Kraftwerke Vetschau und Lübbenau mit Brauchwasser
4 Staumauer der Rappbode-Talsperre mit 106 m Höhe und 450 m Länge



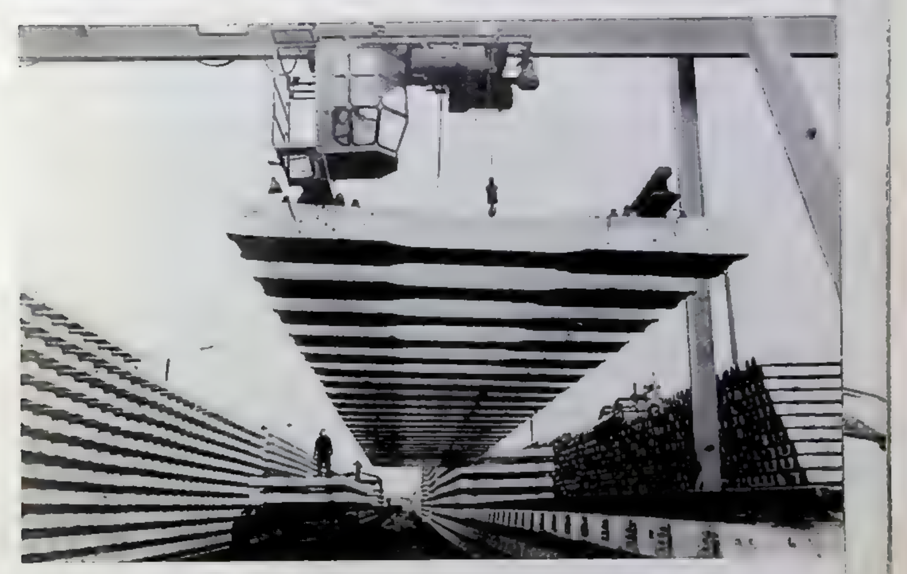
1
2
3

Tafel 60 Bautechnik VI

1 Gleitschalungsfertiger mit Nivellierautomatik im Betonstraßenbau
2 Automatische Mischsplitt-Aufbereitungsanlage „Teltomat"
3 Schwarzdeckenfertiger









1 2
3
4

Tafel 61 Technik der Verkehrsmittel I

1 Umsetzanlage im sowjetischen Grenzbahnhof Brest; der Waggon wird angehoben und liegt auf 4 Säulen auf, danach werden die Fahrgestelle ausgewechselt und der Waggon wieder abgesenkt
2 Montage der Elektrolok EL 2
3 Stapelplatz für vormontierte Gleisjoche
4 Rechnergesteuerte Gleisbremse zum Abstoppen zu schnell ablaufender Waggons



1 2
3
4

Tafel 62
Technik der Verkehrsmittel II

1 Containerbahnhof Brno mit Portalkrananlage
2 Japanischer Probezug für Geschwindigkeiten von ≈ 500 km/h; der Antrieb erfolgt mit einem Linearmotor und das Fahrzeug wird durch starke Magnetfelder vom Boden angehoben und gleitet dadurch auf einem Luftpolster
3 Vorderradaufhängung an Doppelquerlenkern mit Schraubenfedern
4 Multliftgerät auf LKW zum Auf- oder Absetzen von Behältern (Container)

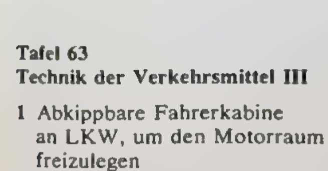








1 2
3
4



Tafel 63
Technik der Verkehrsmittel III

1 Abkippbare Fahrerkabine an LKW, um den Motorraum freizulegen
2 Kleintransporter „Multicar“ mit abkippbarer Kabine
3 Elektro-Testfahrzeug mit ausgefahrenem Batteriesatz
4 Citroën CX 2400 mit strömungstechnisch günstiger Karosseriegestaltung



1

2 3

4

Tafel 64 Technik der Verkehrsmittel IV

1 Dreifach-Tandem-Stromschubverband
2 Britische Luftkissen-Kanalfähre; 70 kn, 500 Passagiere
3 Montage der Vorschiffssektion von einem Binnenfahrgastschiff
4 Sowjetisches Tragflächenschiff „Meteor“ für den Einsatz auf Binnengewässern









1
2 3
4

Tafel 65 Technik der Verkehrsmittel V

1 Stückgutfrachtschiff vom Typ „Poseidon“ mit Wulstbug
2 Ro-Ro-Schiff mit Heckpforte
3 Querstapellauf eines Stückgutfrachtschiffs
4 Schwimmdock von 150 m Länge, 31 m Breite und 80 MN Hubkraft



1
2 3
4

Tafel 66
Technik der Verkehrsmittel VI

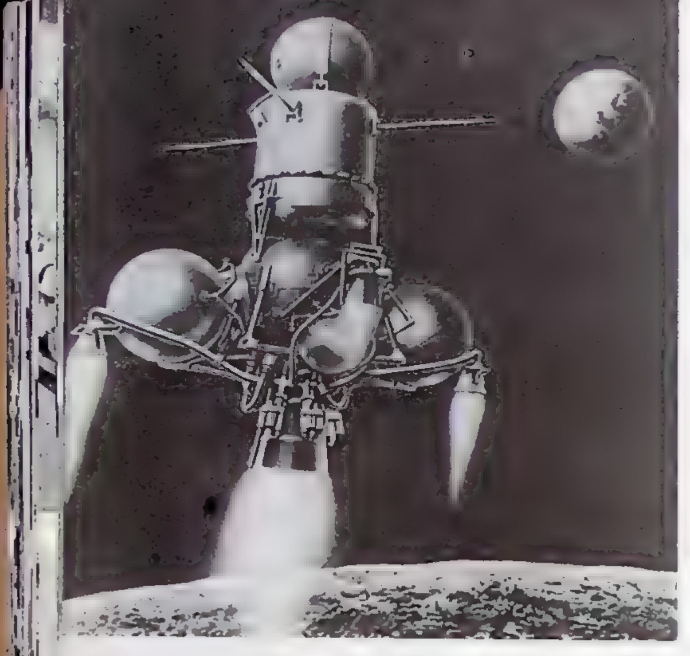
1 Landung eines Jagdflugzeugs mit Bremsfallschirm zur Verkürzung der Landestrecke
2 Versorgung eines Verkehrsflugzeugs mit Bordverpflegung (Catering)
3 Aufstellen von Stahlgittermasten für Hochspannungsfreileitungen mit Hilfe eines Hubschraubers Mi 8
4 Cockpit der Hawker Siddeley „Trident" während der letzten Phase der automatischen Landung



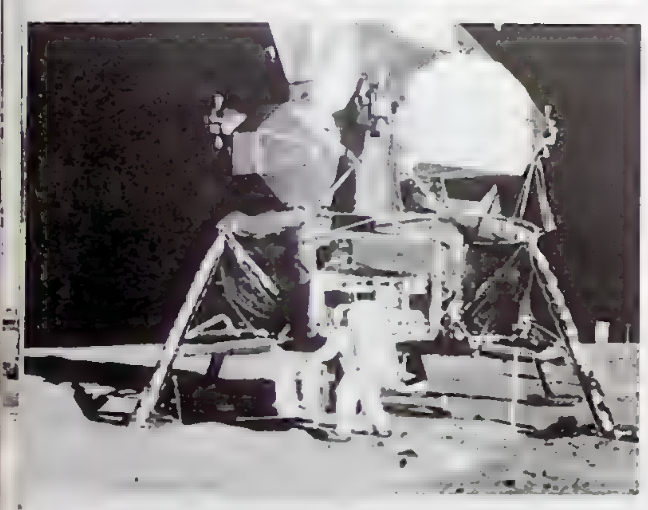
1
2
3

Tafel 67
Technik der
Verkehrsmittel VII

1 Überschall-Verkehrsflugzeug Tupolew „Tu 144“ (4 ZTL mit Nachbrenner, 2 550 km/h Fluggeschwindigkeit, 21 000 m Reiseflughöhe, 121 Fluggäste
2 Zweisitziges britisches Mehrzweckflugzeug vom Typ Harrier
3 Beladen eines Agrarflugzeugs mit Hilfe eines Mobilbaggers und aufgesetzten Einfülltrichter zur Düngung aus der Luft









1 2 5 6
3 4 7
8

Tafel 68/69 Raumfahrttechnik I/II

1 Start der Rückkehrstufe von „Luna 16" vom Mond; die fehlende Atmosphäre ermöglicht den Verzicht auf eine aerodynamisch günstige Form
2 Die „Saturn V" – Trägerrakete der amerikanischen Apolloraumschiffe auf der Startplattform
3 Die Landefähre „Eagle" von „Apollo 11" auf der Mondoberfläche; *Aldrin* stellt Meßgeräte auf
4 Raketenstartplatz Baikonur der sowjetischen Wostok- und Sojusraumschiffe
5 Arbeitsraum der sowjetischen Orbitalstation „Salut 1"; *hinten* Luke zum Schleusengang
6 Sowjetisches Flugleitzentrum Kaliningrad; *hinten* Projektionswand auf der die Flugbahnen der Raumflugkörper verfolgt werden können
7 Kopplungsmanöver der Raumschiffe Sojus und Apollo
8 „Huckepack"-Erprobung des Raumgleiters „space shuttle" der NASA in 10 km Höhe

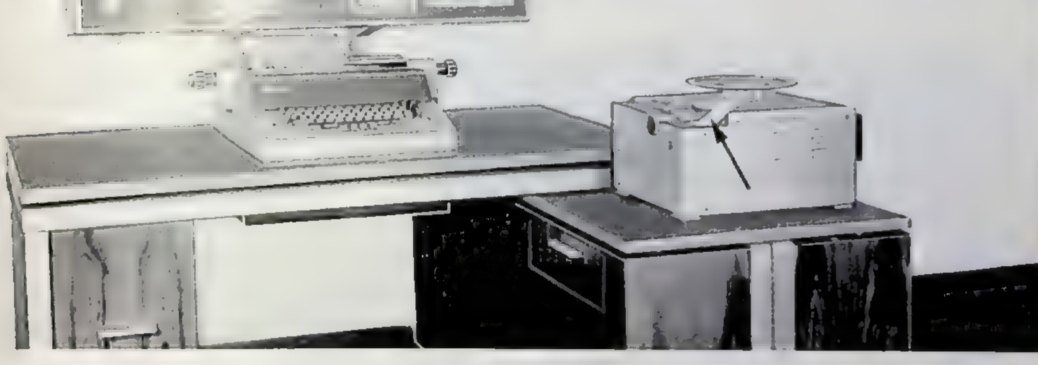

United States
NASA
905



1
2 3
4

Tafel 70 Polygrafische Technik I

1 Horizontal-Zweiraum-Reproduktionskamera
2 Elektronische Farbauszugsgeräte (Scanner)
3 Vertikal-Zweiraum-Reproduktionskamera
4 Einstufenätzmaschine zur Herstellung von Ätzungen für den Buchdruck, *links* aufgespannte Mikrozinkätzung



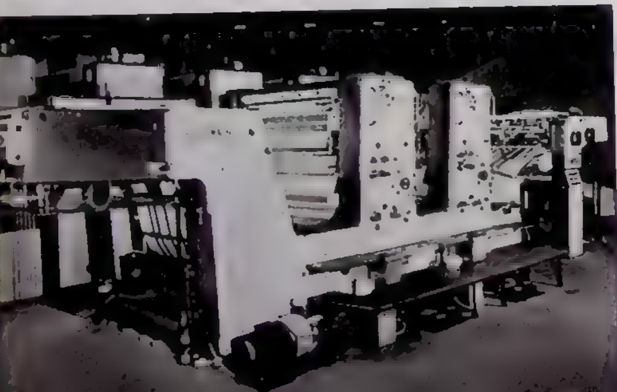
1 2
3
4



Tafel 71 Polygrafische Technik II

1 Objektivrad der Lichtsetzmaschine Lumitype (*Pfeil* zeigt auf die Matrizenscheibe)
2 Lochbandgesteuerte Zeilensetzmaschine (Schnellsetztechnik), *Pfeil* zeigt auf das Steuerlochband
3 Tastomat zum Anfertigen des Endloslochbands zur Steuerung von Setzmaschinen
4 Matrizenscheibe (Ausschnitt) der Lumitype mit 16 Alphabeten zu je 90 Zeichen

1
2
3
4



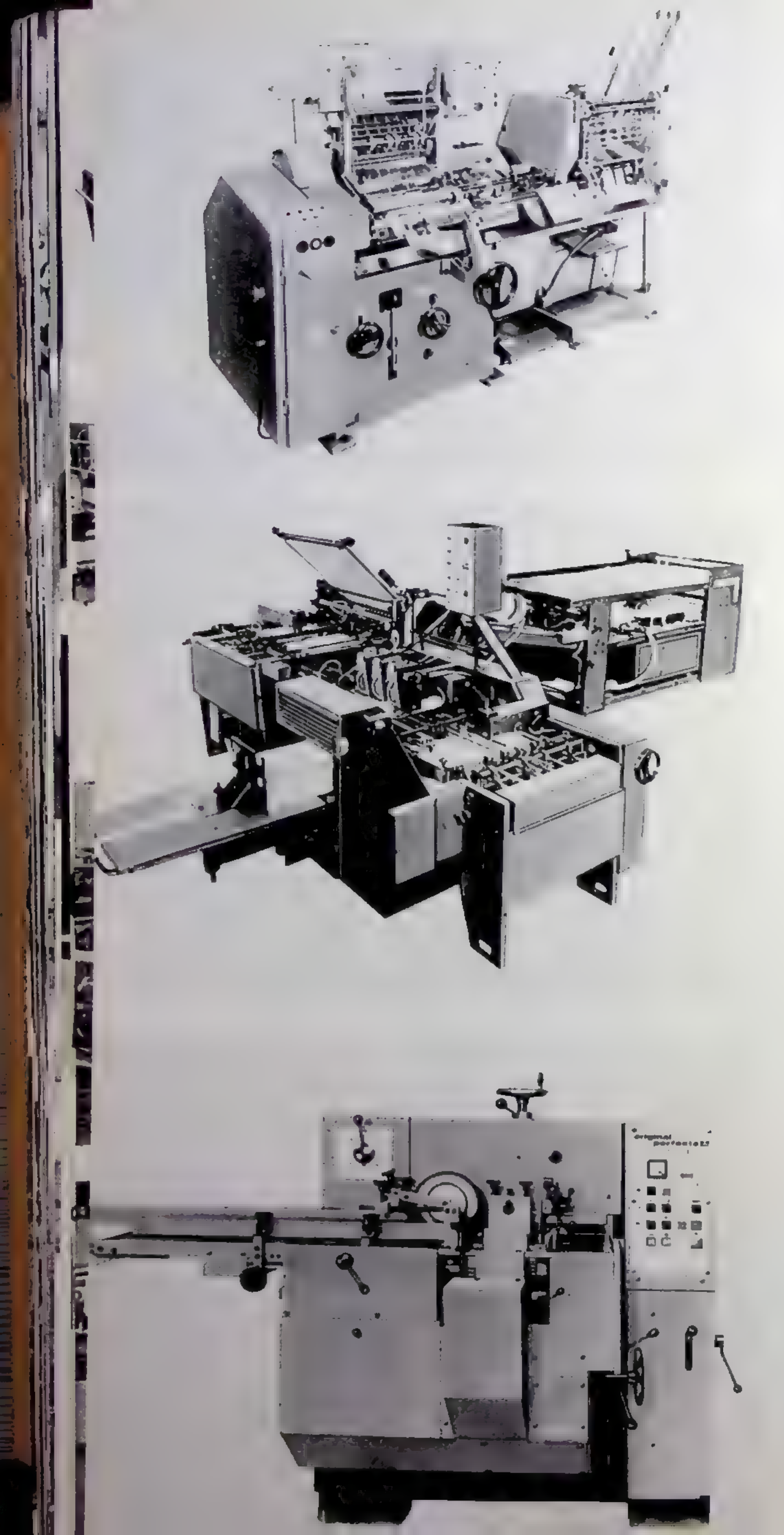
Tafel 72 Polygrafische Technik III

1 Stoppzylinder-Automat V 1040 für den Buchdruck; die Bogen werden jeweils in der Ruhestellung des Druckzylinders von den Greifern erfaßt
2 Rollen-Rotations-Tiefdruckmaschine mit 3 gekapselten Farbwerken
3 Antriebsseite einer Rollen-Rotations-Offsetdruckmaschine
4 Zweifarben-Bogen-Rotations-Offsetdruckmaschine mit einer Druckleistung von 10000 Bogen/h

1
2
3
4

Tafel 73 Polygrafische Technik IV

1 Schnellschneidemaschine mit Fotozellensicherung
2 Kombinationsfalzautomat der Multieffekt-Reihe; der 1. Bruch wird durch Stauchfalzung, der 2. und 3. Bruch durch Messerfalzung erzeugt
3 Messerfalzautomat für Drei-Bruch-Falzungen
4 An eine Taschenfalzmaschine angekuppelter automatischer Bündelausleger



1
2
3

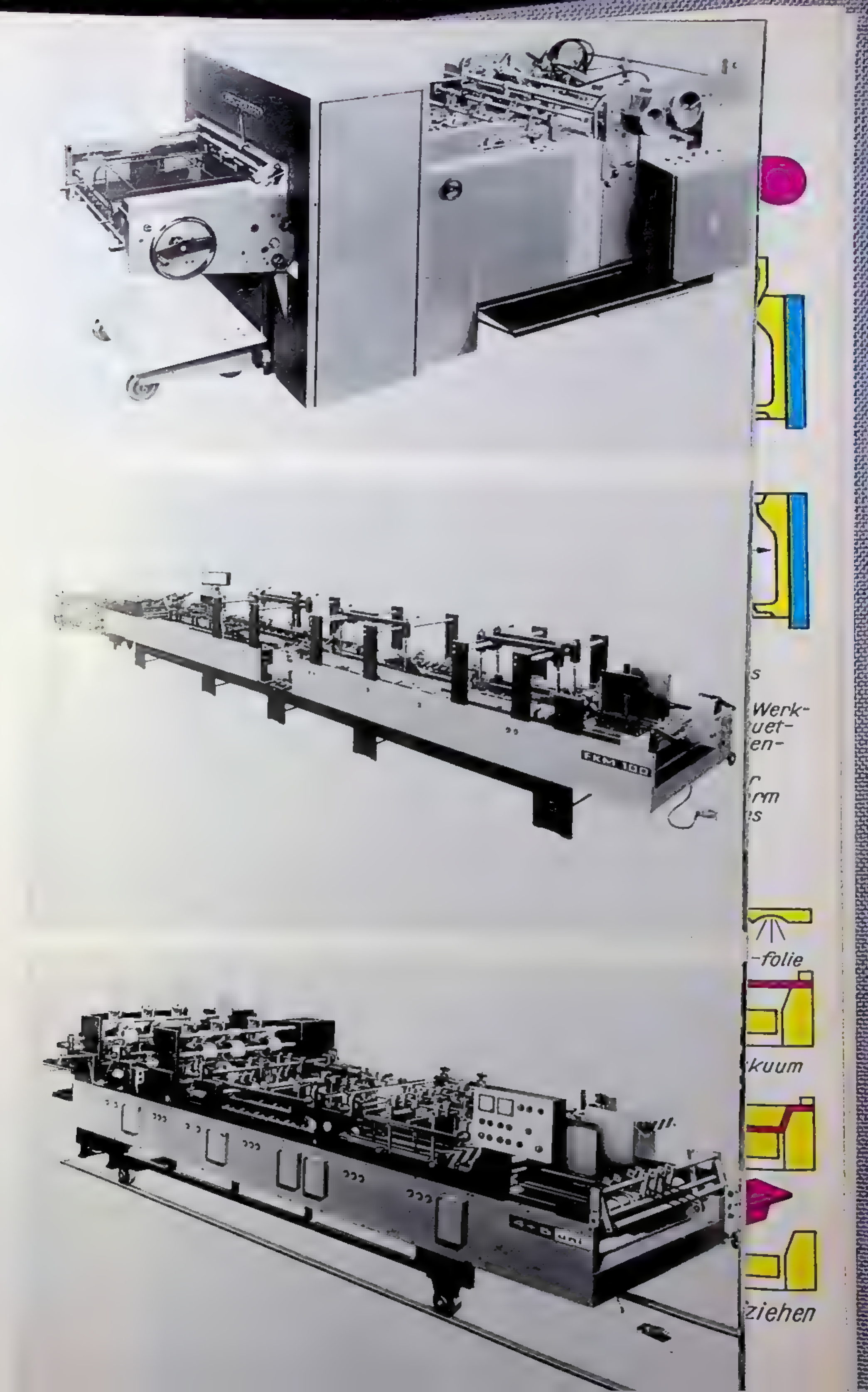
Tafel 74
Polygrafische Technik V

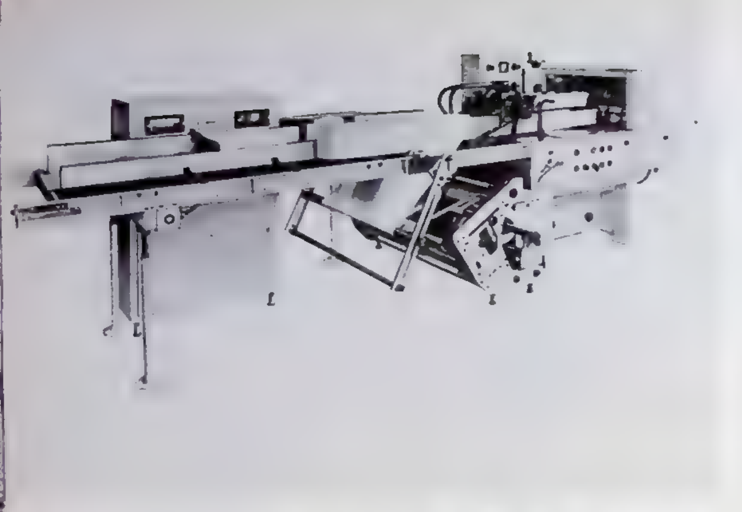
1 Buchfadenheftautomat; die Zuführung des Heftfadens und der Falzbogen (*rechts* das Magazin) erfolgen automatisch entsprechend dem Arbeitstakt
2 Falzsiegelautomat aus der Multieffektreihe mit Stauch- und Messerfalzung
3 Automatische Dreimessermaschine zur Buchblockbearbeitung

1
2
3

Tafel 75
Verpackungstechnik I

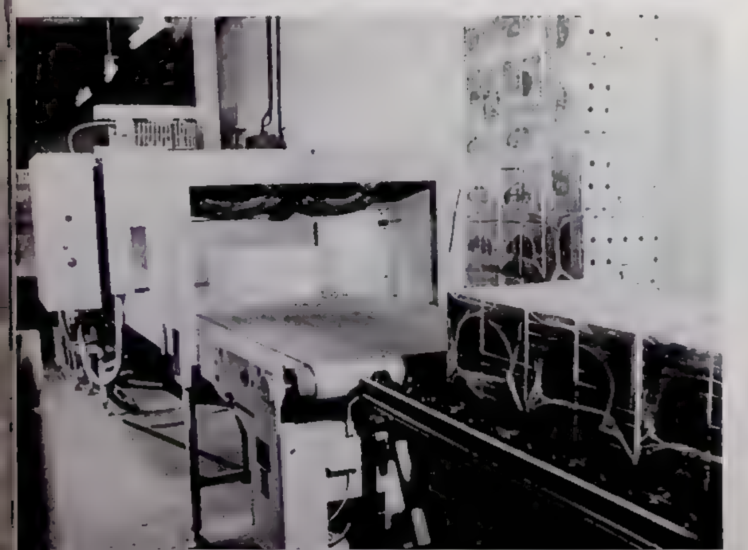
1 Stanzautomat
2 Hochleistungs-Faltschachtelklebemaschine
3 Universalpunktklebemaschine zur Fertigung von vier- und sechspunktbeleimten Faltschachteln, kann mit der Faltschachtelklebemaschine verkettet werden







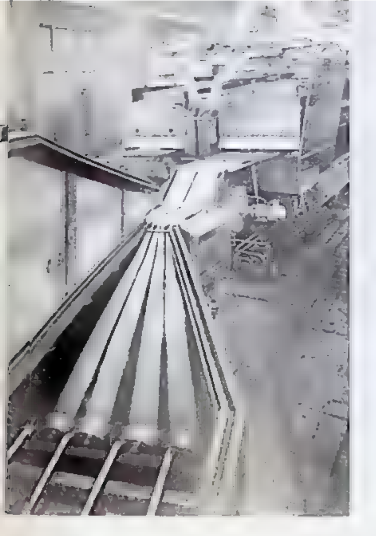


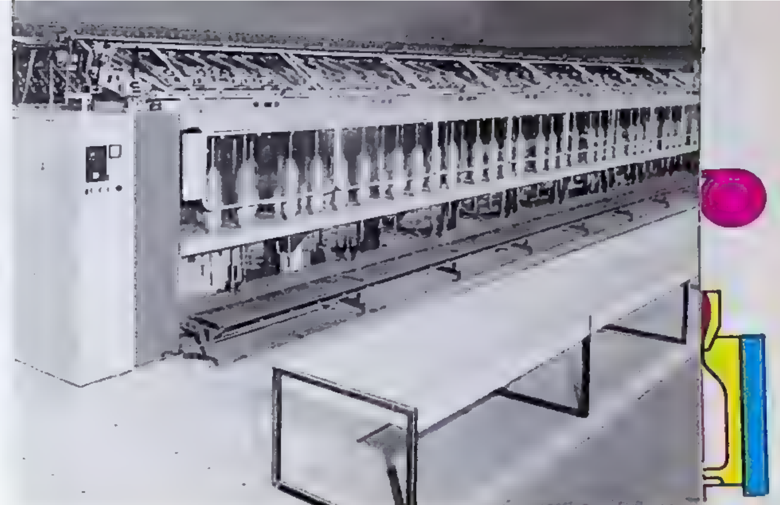


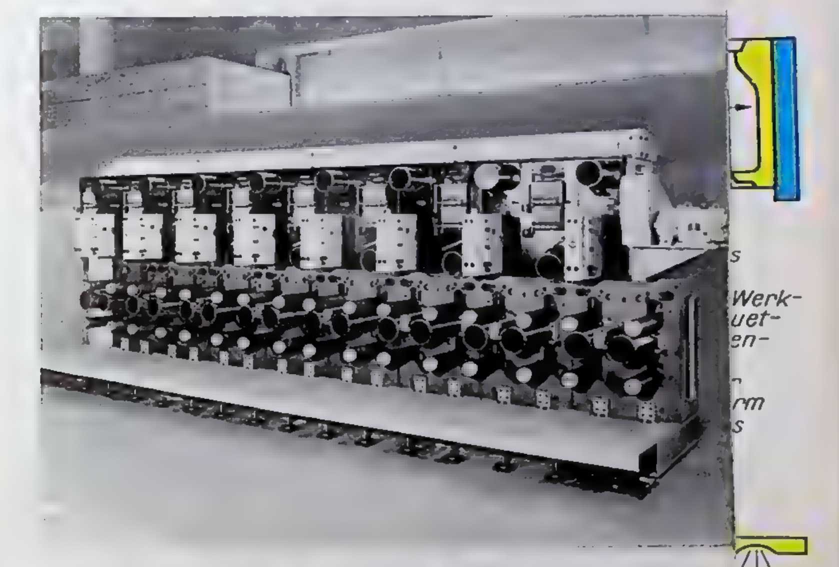
1 2
3
4

Tafel 76 Verpackungstechnik II

1 Intermittierend arbeitende Form-, Füll- und Verschließmaschine für Stückgüter im Schlauchbeutel
2 Einschlagmaschine für Hartkaramellen mit beidseitigem Dreheinschlag
3 Sammelpackanlage mit Schrumpffolienverpackung
4 Schrumpffolienverpackungsmaschine





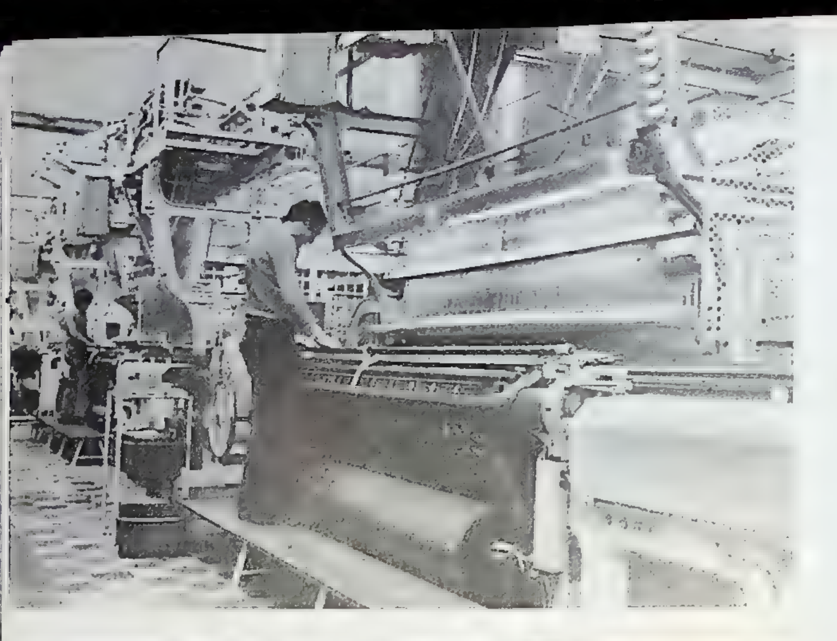


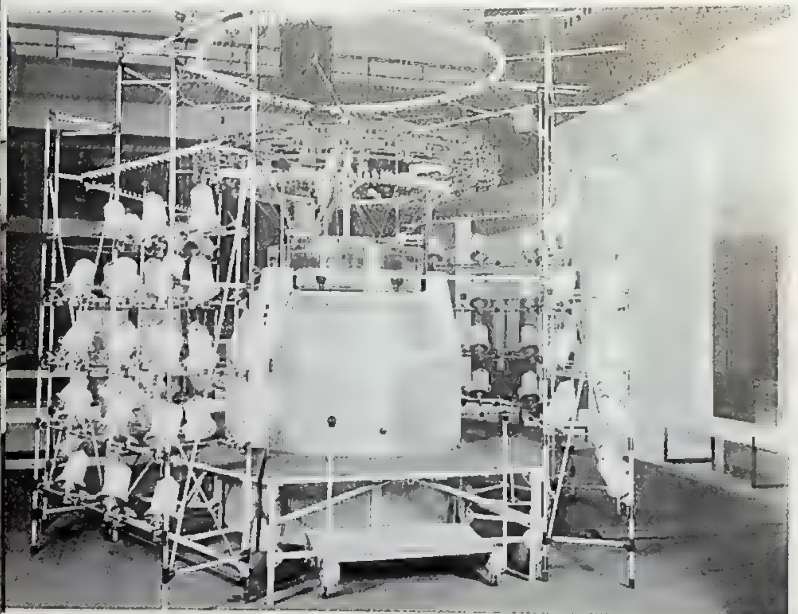


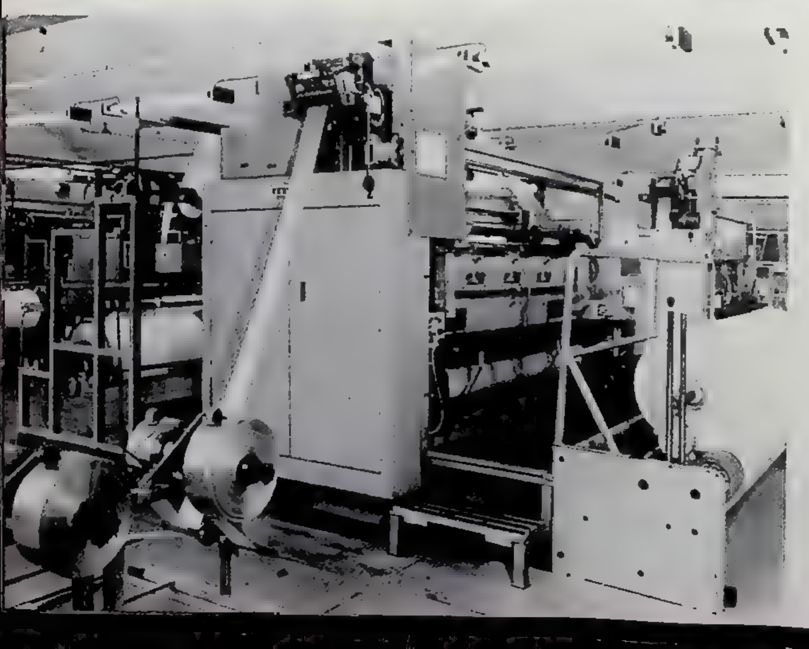
1 2
3
4

Tafel 77 Textiltechnik I

1 Teil der Faserbandanlage Wolpryla 65
2 Kammgarn-Flyer
3 Aufspulmaschine für Chemiefasern
4 Flachstrickmaschinen für reguläre Gestrickteile



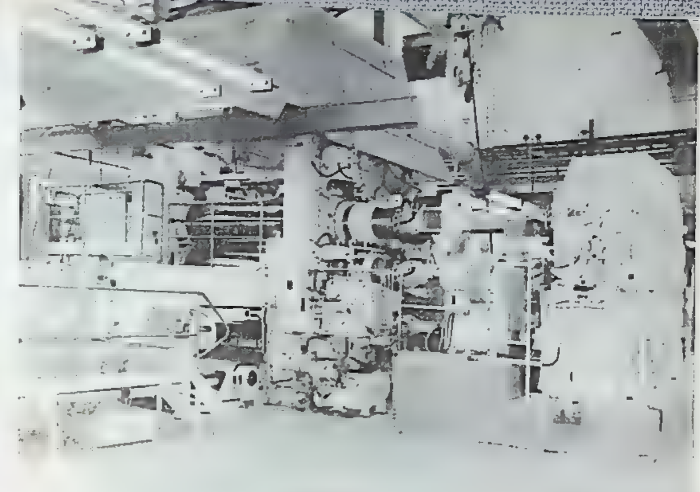


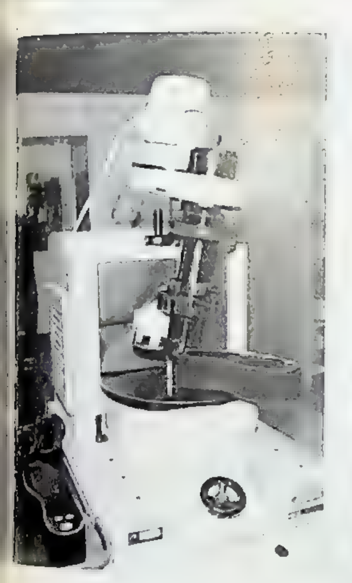


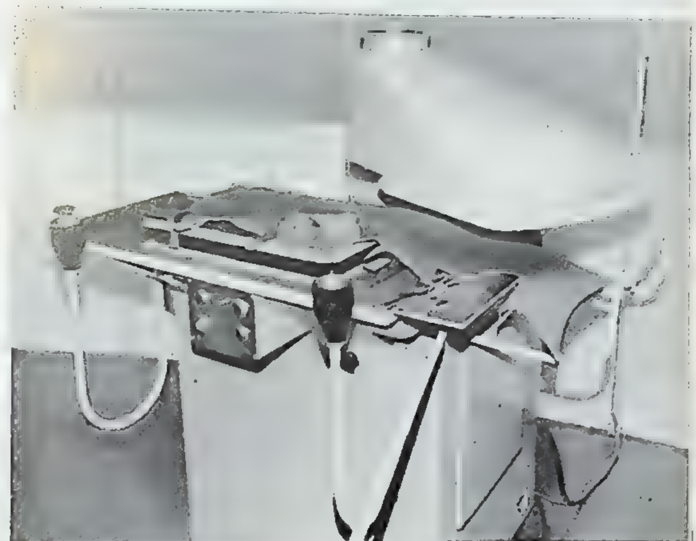
Tafel 78 Textiltechnik II

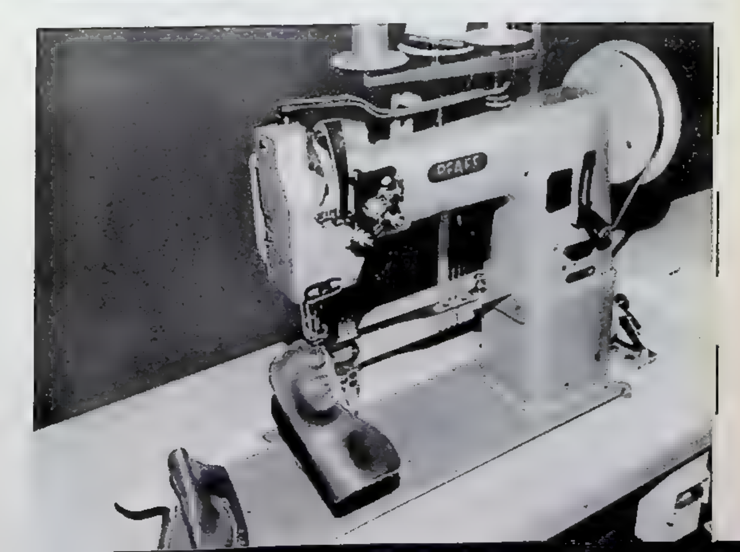
1 Jacquard-Teppichwebmaschine zur Herstellung durchgemusterter Teppiche
2 Großrundstrickmaschine für Obertrikotagen
3 Malimomaschine zur Florofolherstellung











1 2
3 4
5

Tafel 79 **Ledertechnik I**

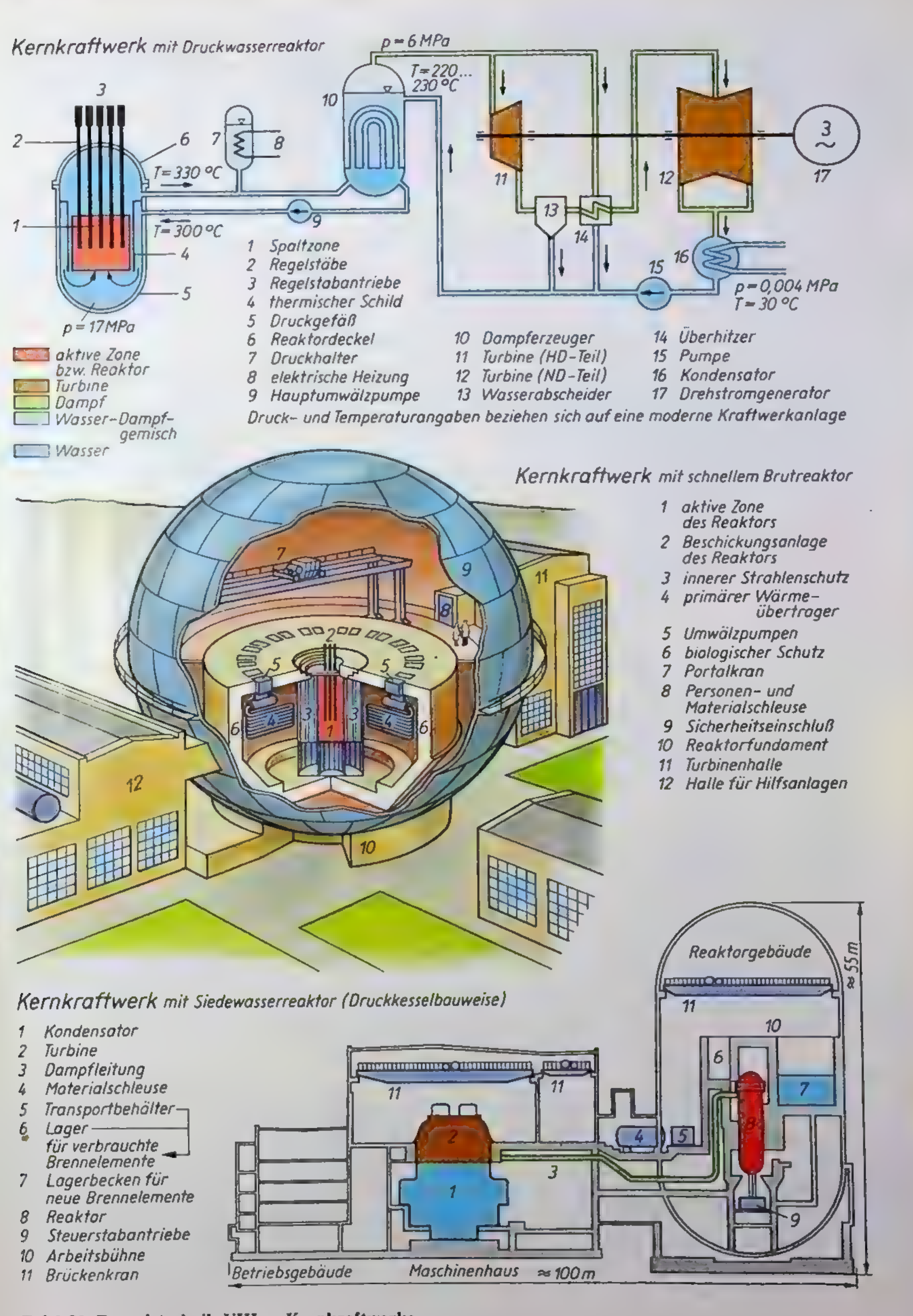
1 Wasserstrahlschneiden von Leder, *unten* Auffangvorrichtung für den Wasserstrahl (vergrößerte Abbildung)
2 Kalanderanlage zum Auswalzen dünner Kunststoffolien
3 Formsohlenaufrauhmaschine zur Vorbereitung des Kleberauftrags
4 Elektrohydraulische Schwenkarmstanze für die Schuhzuschnittfertigung
5 Einnadel-Säulennähmaschine



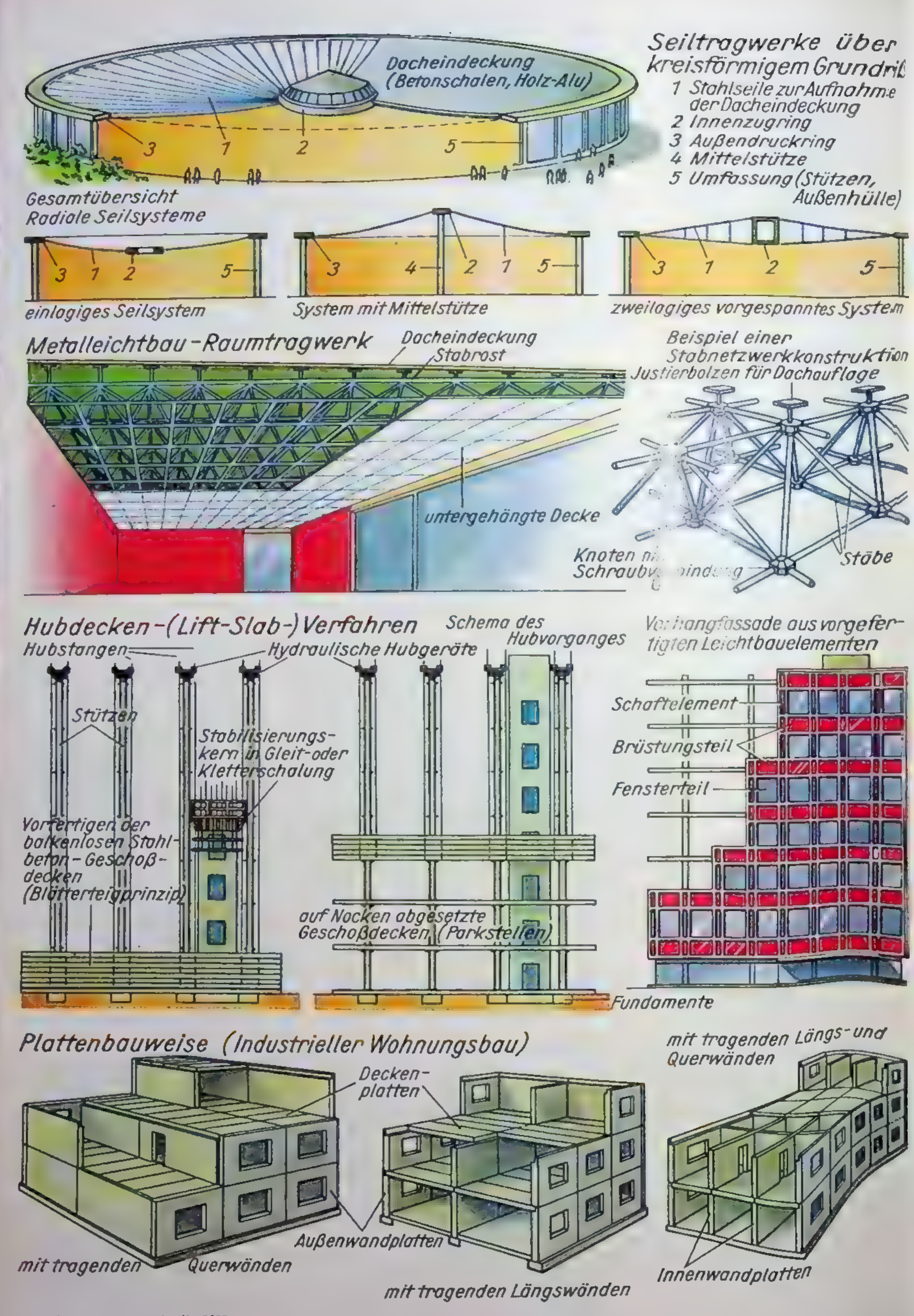
1
2
3
4

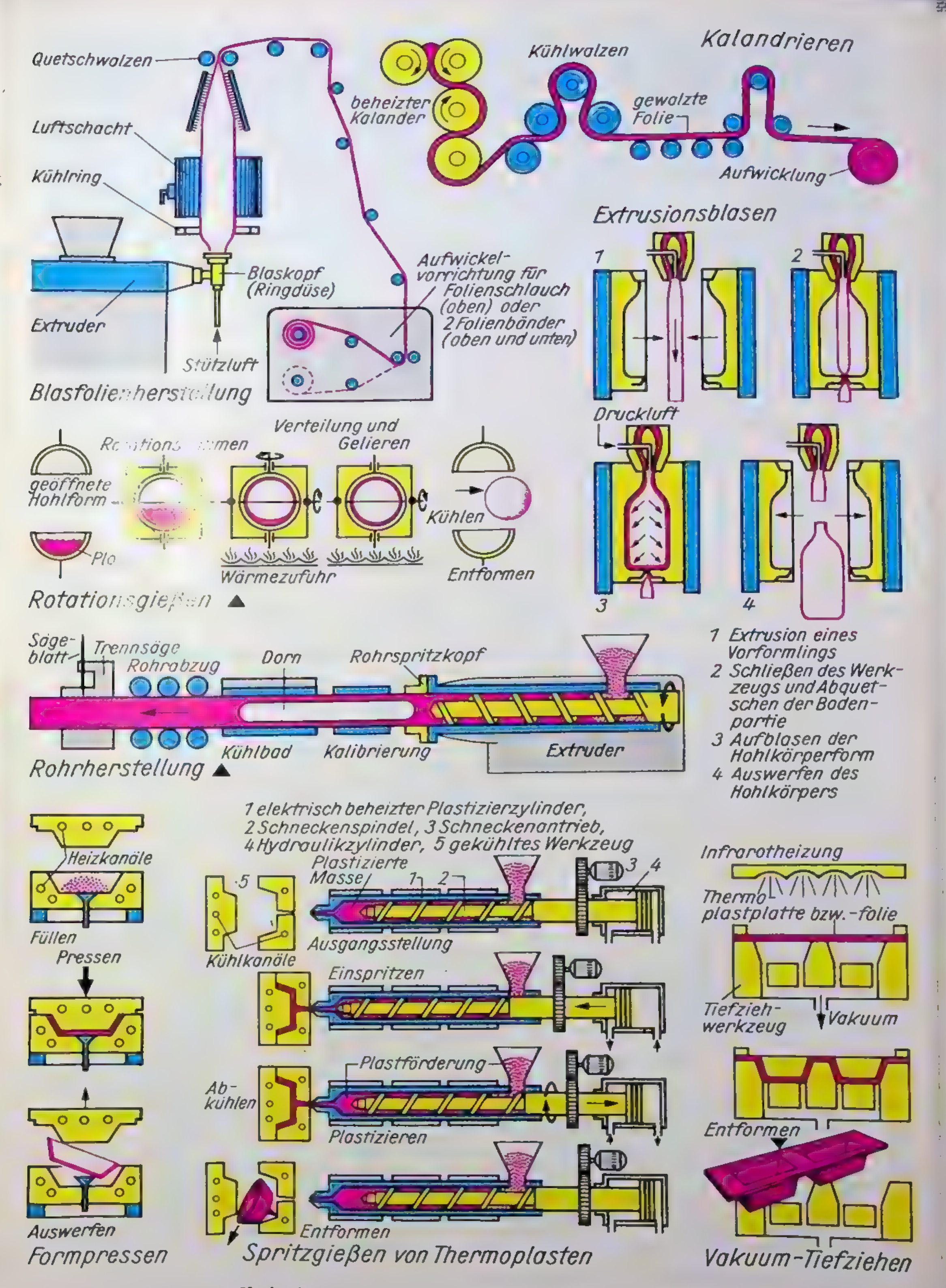
Tafel 80 Ledertechnik II

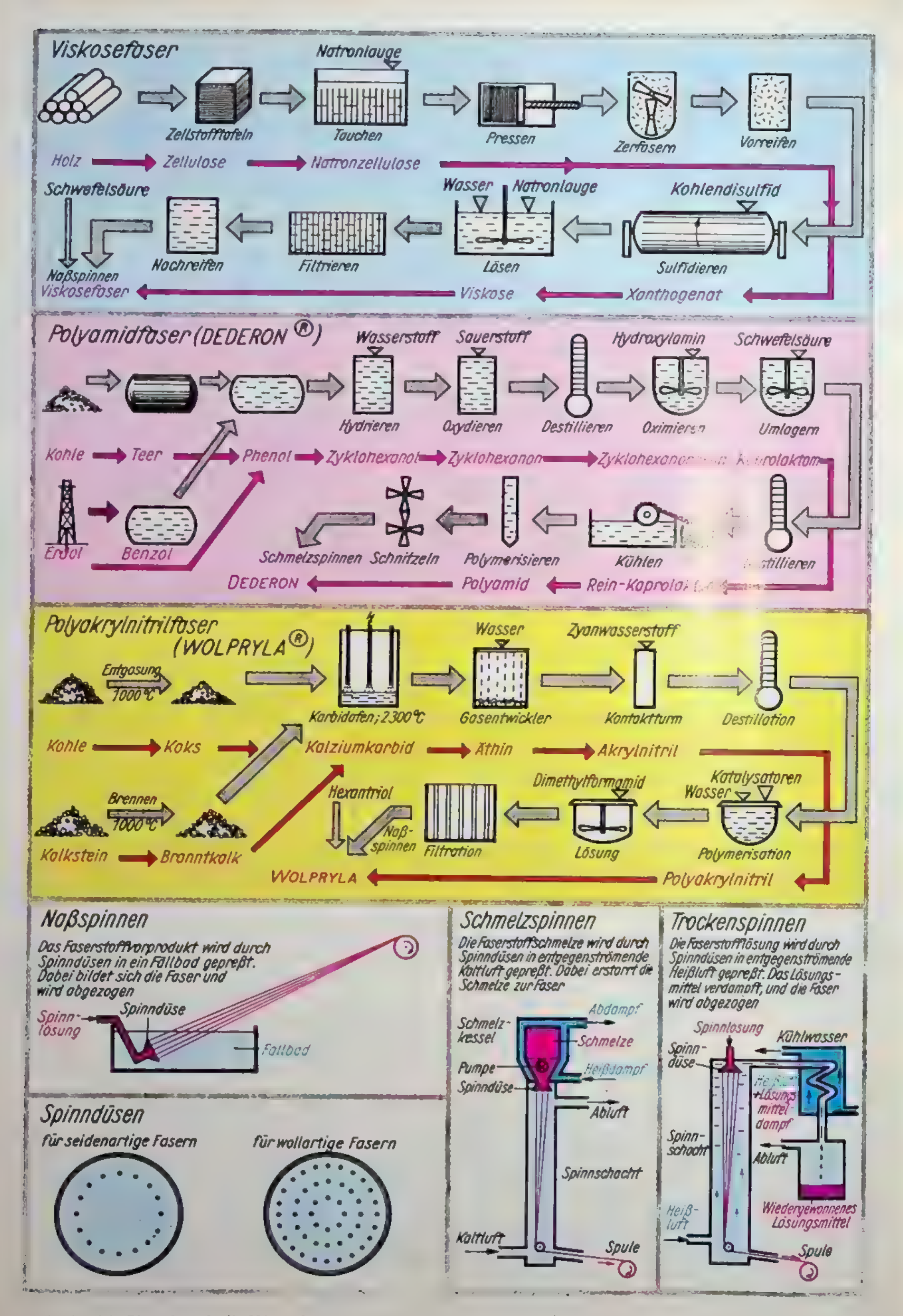
1 Entfleischmaschine zum Entfernen des Unterhautbindegewebes von der Lederhaut
2 Zackenapparat zum Vorbereiten des Zusammennähens von Fellen zu Streifen und Bodies
3 Infrarot-Trockenanlage für Pelzstreifen; auf der Oberseite der Platte können schon während des Trocknens die nächsten Streifen aufgezwickt werden
4 Durchlauf-Reckmaschine für Kleintierfelle



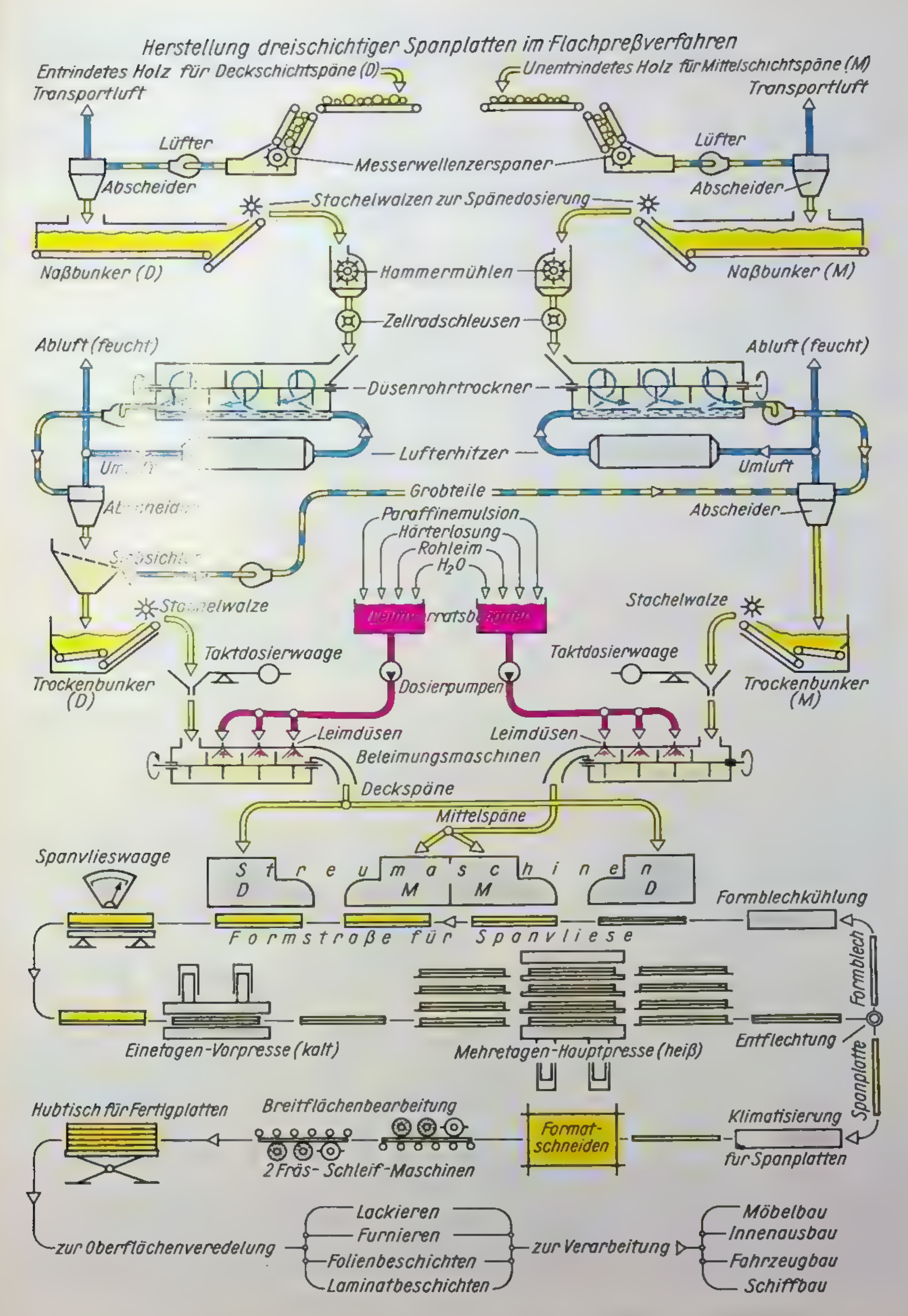
Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor
p = 6 MPa
T = 220 ... 230 °C
T = 330 °C
T = 300 °C
p = 17 MPa
p = 0,004 MPa
T = 30 °C
1 Spaltzone
2 Regelstäbe
3 Regelstabantriebe
4 thermischer Schild
5 Druckgefäß
6 Reaktordeckel
7 Druckhalter
8 elektrische Heizung
9 Hauptumwälzpumpe
10 Dampferzeuger
11 Turbine (HD-Teil)
12 Turbine (ND-Teil)
13 Wasserabscheider
14 Überhitzer
15 Pumpe
16 Kondensator
17 Drehstromgenerator
aktive Zone bzw. Reaktor
Turbine
Dampf
Wasser-Dampf-gemisch
Wasser
Druck- und Temperaturangaben beziehen sich auf eine moderne Kraftwerkanlage
Kernkraftwerk mit schnellem Brutreaktor
1 aktive Zone des Reaktors
2 Beschickungsanlage des Reaktors
3 innerer Strahlenschutz
4 primärer Wärmeübertrager
5 Umwälzpumpen
6 biologischer Schutz
7 Portalkran
8 Personen- und Materialschleuse
9 Sicherheitseinschluß
10 Reaktorfundament
11 Turbinenhalle
12 Halle für Hilfsanlagen
Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (Druckkesselbauweise)
1 Kondensator
2 Turbine
3 Dampfleitung
4 Materialschleuse
5 Transportbehälter
6 Lager für verbrauchte Brennelemente
7 Lagerbecken für neue Brennelemente
8 Reaktor
9 Steuerstabantriebe
10 Arbeitsbühne
11 Brückenkran
Reaktorgebäude
≈ 55 m
Betriebsgebäude
Maschinenhaus
≈ 100 m


Seiltragwerke über kreisförmigem Grundriß
1 Stahlseile zur Aufnahme der Dacheindeckung
2 Innenzugring
3 Außendruckring
4 Mittelstütze
5 Umfassung (Stützen, Außenhülle)
Dacheindeckung (Betonschalen, Holz-Alu)
Gesamtübersicht Radiale Seilsysteme
einlagiges Seilsystem
System mit Mittelstütze
zweilagiges vorgespanntes System
Metalleichtbau-Raumtragwerk
Dacheindeckung
Stabrost
untergehängte Decke
Beispiel einer Stabnetzwerkkonstruktion
Justierbolzen für Dachauflage
Knoten mit Schraubverbindung
Stäbe
Hubdecken-(Lift-Slab-)Verfahren
Hubstangen
Hydraulische Hubgeräte
Schema des Hubvorganges
Stützen
Stabilisierungskern in Gleit- oder Kletterschalung
Vorfertigen der balkenlosen Stahlbeton-Geschoßdecken (Blätterteigprinzip)
auf Nocken abgesetzte Geschoßdecken (Parkstellen)
Fundamente
Vorhangfassade aus vorgefertigten Leichtbauelementen
Schaftelement
Brüstungsteil
Fensterteil
Plattenbauweise (Industrieller Wohnungsbau)
Deckenplatten
Außenwandplatten
mit tragenden Querwänden
mit tragenden Längswänden
mit tragenden Längs- und Querwänden
Innenwandplatten

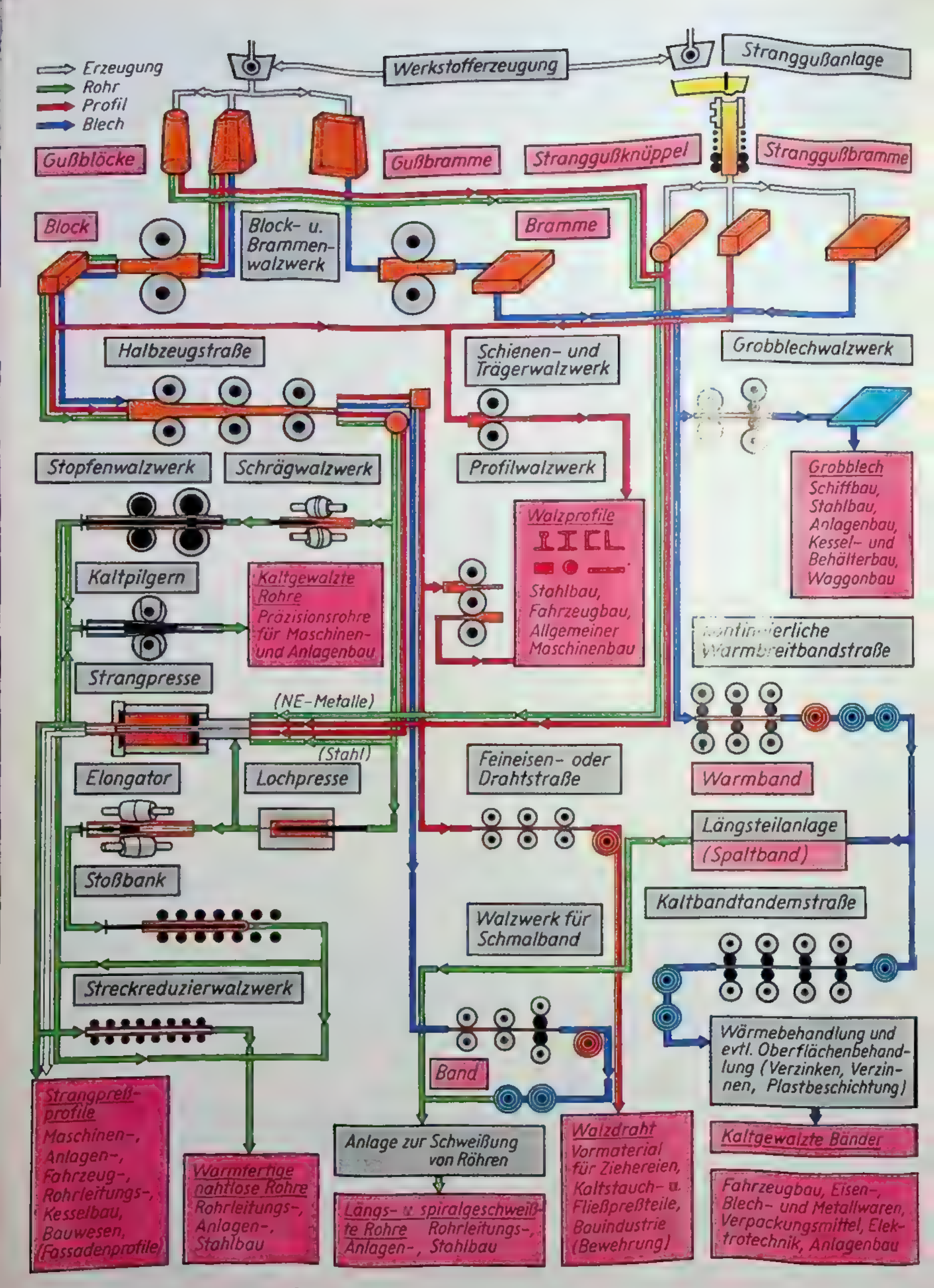

Quetschwalzen
Luftschacht
Kühlring
Extruder
Blaskopf (Ringdüse)
Stützluft
Aufwickelvorrichtung für Folienschlauch (oben) oder 2 Folienbänder (oben und unten)
Blasfolienherstellung
beheizter Kalander
Kühlwalzen
gewalzte Folie
Aufwicklung
Kalandrieren
Extrusionsblasen
Druckluft
1 Extrusion eines Vorformlings
2 Schließen des Werkzeugs und Abquetschen der Bodenpartie
3 Aufblasen der Hohlkörperform
4 Auswerfen des Hohlkörpers
Verteilung und Gelieren
geöffnete Hohlform
Kühlen
Wärmezufuhr
Entformen
Sägeblatt
Trennsäge
Rohrabzug
Dorn
Rohrspritzkopf
Kühlbad
Kalibrierung
Extruder
Rohrherstellung
Heizkanäle
Füllen
Pressen
Auswerfen
Formpressen
1 elektrisch beheizter Plastizierzylinder, 2 Schneckenspindel, 3 Schneckenantrieb, 4 Hydraulikzylinder, 5 gekühltes Werkzeug
Plastizierte Masse
Kühlkanäle
Ausgangsstellung
Einspritzen
Plastförderung
Abkühlen
Plastizieren
Entformen
Spritzgießen von Thermoplasten
Infrarotheizung
Thermoplastplatte bzw. -folie
Tiefziehwerkzeug
Vakuum
Entformen
Vakuum-Tiefziehen



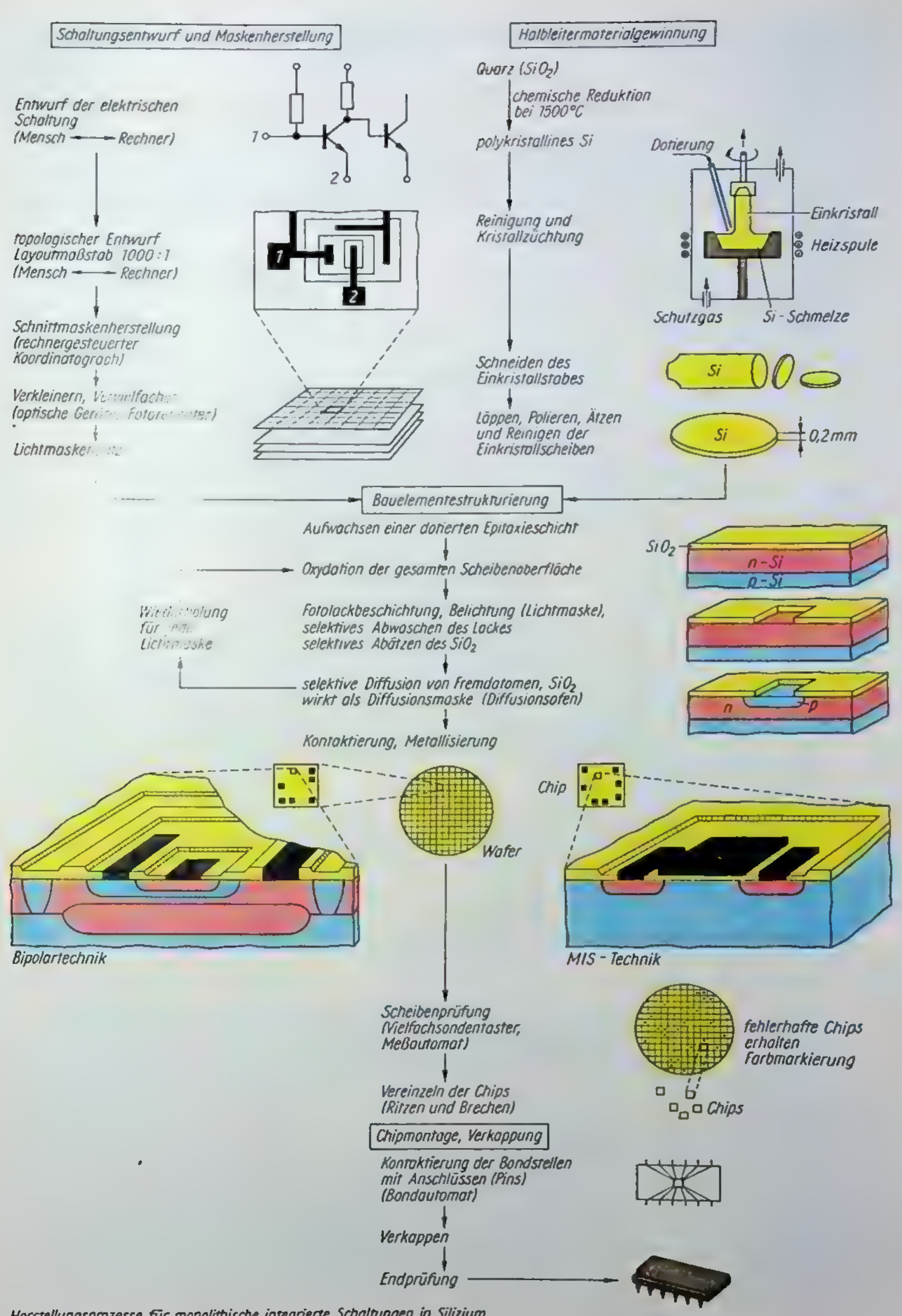
Tafel 84 Chemietechnik III — Chemiefaserstoffe



Tafel 85 Holztechnik III — Spanplattenherstellung



Tafel 86 Metallurgie V — Halbzeugherstellung



Herstellungsprozesse für monolithische integrierte Schaltungen in Silizium

Prinzipaufbau eines Mikroprozessors (= Zentraleinheit eines Mikrorechners)

Prinzipaufbau und Informationsfluß eines Mikroprozessorsystems (MPS)
(MPS + externe Geräte = Mikrorechner)

Tafel 88 Rechen- und Datenverarbeitungstechnik II

PROZESS

(z.B. chemische Produktion, Kfz-Montage, Gerätebau, Energieversorgung, Meßsystem, Patienten in Dauerüberwachung, Straßenverkehr usw.)

Datenquelle | Datensenke | . . . . | Datenquelle | Datensenke

Fühler, Meßglieder | Stellglieder | . . . . | Fühler, Meßglieder | Stellglieder

Mikroprozessorsystem | . . . . | Mikroprozessorsystem

Mikroprozessorsystem | Bussystem | Mikroprozessorsystem

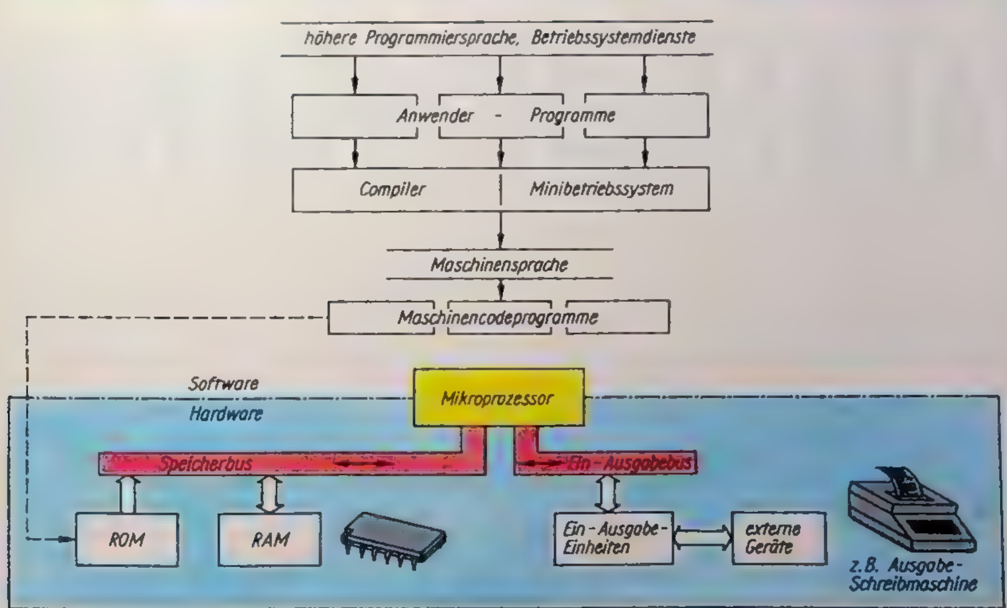
Drucker

Leitstelle

Mensch - Rechner - Kommunikation

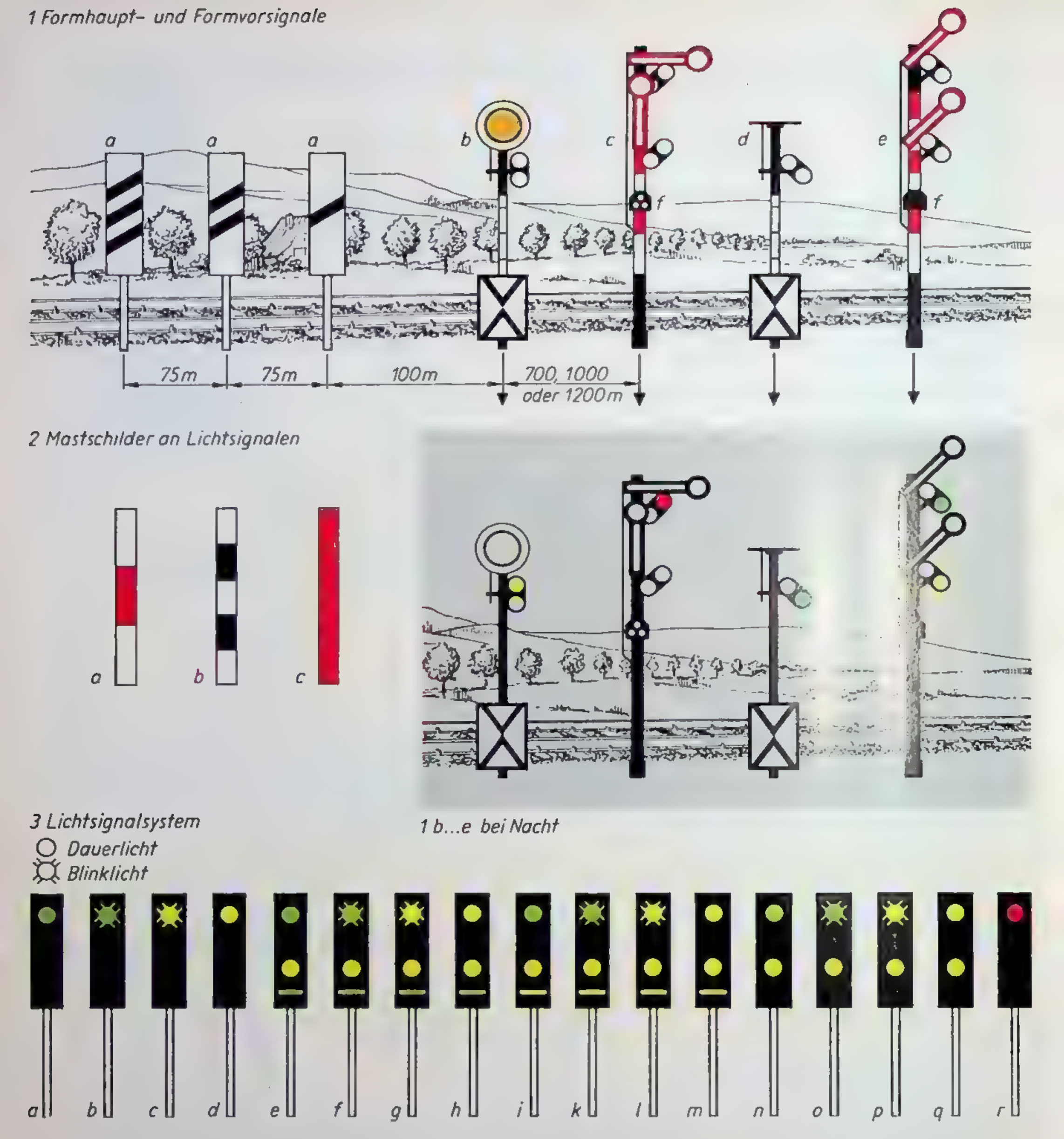
Mensch - Prozeß - Kommunikation

Prozeßautomatisierung durch räumlich verteilte Datenverarbeitung (Mikroprozessoren am Ort des Prozesses)



Produktsystem • kombinierfähige Hardware- und Softwarekomponenten eines Mikroprozessorsystems

Tafel 89 Rechen- und Datenverarbeitungstechnik III

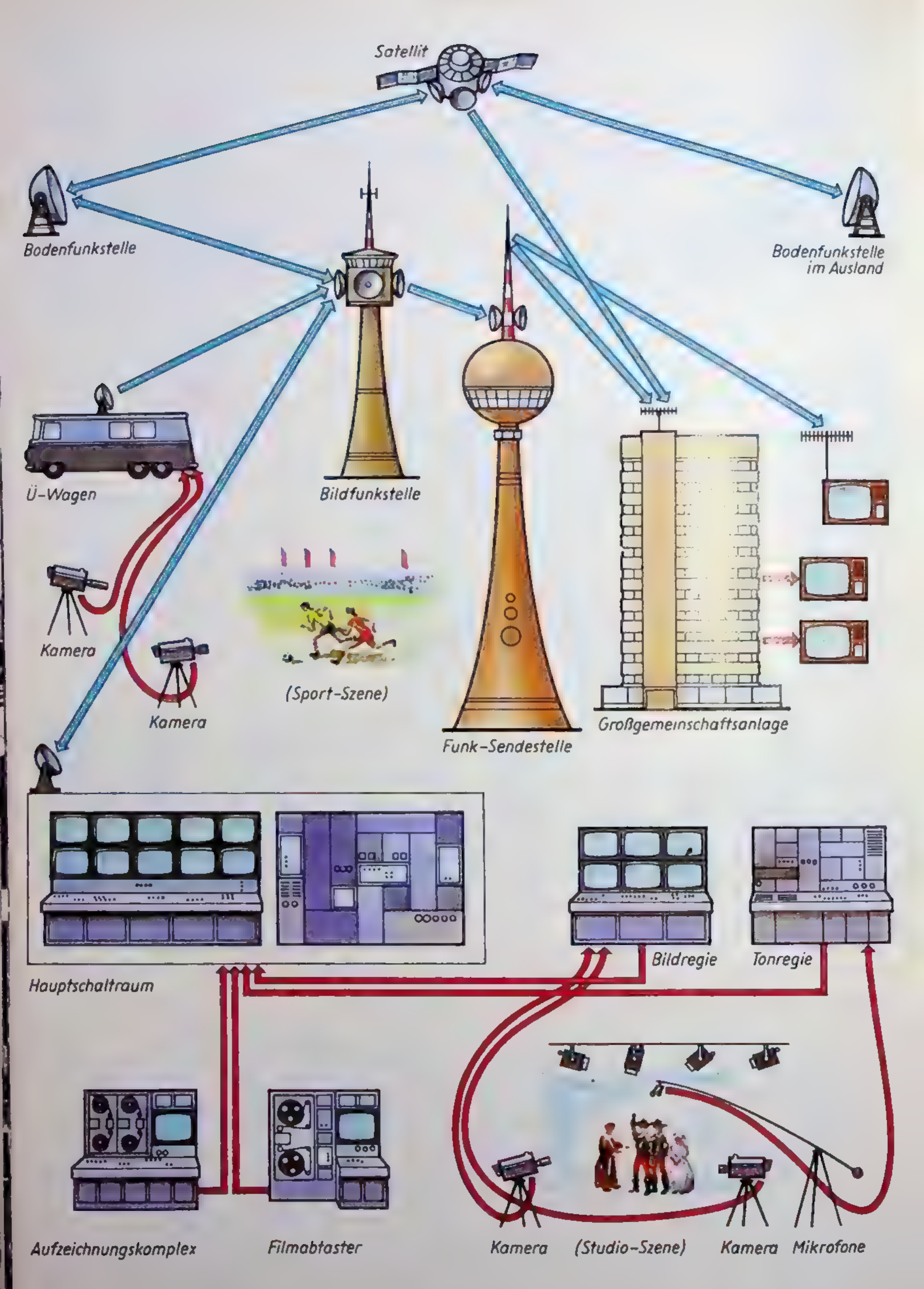


Tafel 90 Technik der Verkehrsmittel VIII — Eisenbahnsignalwesen I

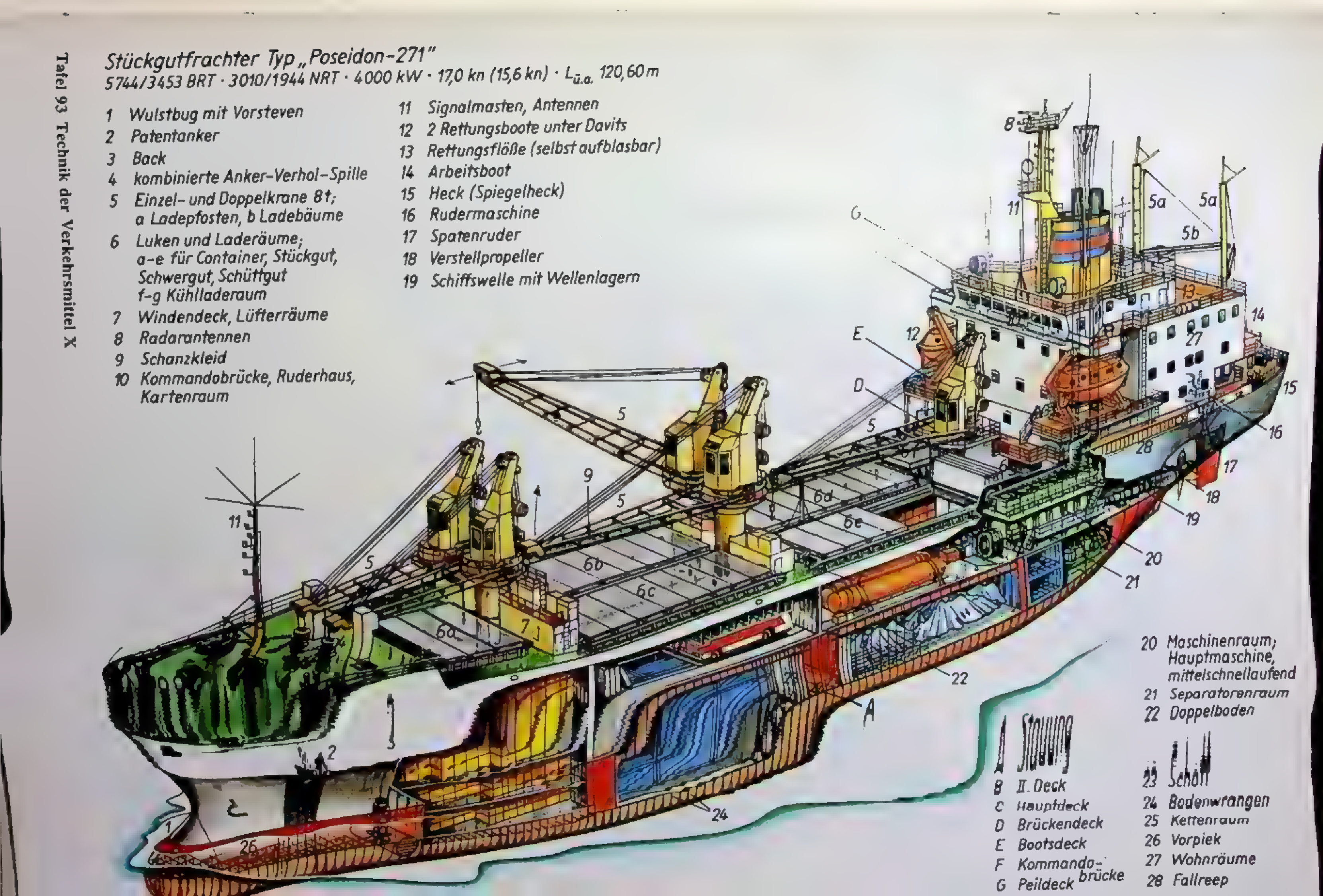
1 Formhaupt- und Formvorsignale: *a* Vorsignalbaken; *b* Vorsignal mit Vorsignaltafel: am Hauptsignal ist „Halt" zu erwarten; *c* Einfahrsignal (Formsignal) in Haltstellung; *d* Vorsignal: am Einfahrsignal ist „Fahrt frei" oder „Fahrt mit Geschwindigkeitsbeschränkung" zu erwarten; *e* Einfahrsignal: „Fahrt mit Geschwindigkeitsbeschränkung; *f* Ersatzsignal für das Hauptsignal bei Signalstörung
2 Mastschilder an Lichtsignalen zur Regelung der Vorbei- und Weiterfahrt bei „Halt" zeigendem oder gestörtem Signal: *a* Vorbeifahrt auf schriftlichen Befehl oder diesen ersetzendes Signal, mit Freisein des folgenden Gleisabschnitts darf gerechnet werden; *b* Nach Halt sofort Weiterfahrt!; *c* Vorbeifahrt wie bei *a*. Bei *b* und *c* kann der folgende Gleisabschnitt mit Fahrzeugen besetzt sein, deshalb ist besondere Vorsicht geboten!
3 Lichtsignalsystem: *a–d* Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit; am nächsten Signal *a* Höchstgeschwindigkeit, *b* 100 km/h, *c* 40 oder 60 km/h, *d* Halt erwarten; *e–h* Fahrt mit 100 km/h; am nächsten Signal *e* Höchstgeschwindigkeit, *f* 100 km/h, *g* 40 oder 60 km/h, *h* Halt erwarten; *i–m* Fahrt mit 60 km/h; am nächsten Signal *i* Höchstgeschwindigkeit, *k* 100 km/h, *l* 40 oder 60 km/h, *m* Halt erwarten; *n–q* Fahrt mit 40 km/h; am nächsten Signal *n* Höchstgeschwindigkeit, *o* 100 km/h, *p* 40 oder 60 km/h, *q* Halt erwarten; *r* Halt für Zug- und Rangierfahrten

Tafel 91 Technik der Verkehrsmittel IX — Eisenbahnsignalwesen II

1 Gleissperrung (Unfall): a Haltvorscheibe; *b* Haltscheibe; *c* Regelschlußsignal. 2 Langsamfahrstelle (Baustelle): *a* und *b* Langsamfahrscheibe (30 km/h); *b* Anfangsscheibe; *c* Endscheibe; *e* vereinfachtes Schlußsignal. 3 Bremsprobesignale: *a* Bremse anlegen; *b* Bremse lösen; *c* Bremse in Ordnung. 4 Gleissperrsignal: a Halt! Fahrverbot; *b* Fahrverbot aufgehoben. 5 Rangierhalt- und Rangierfahrtsignal. 6 Kreissignal — sofort halten! 7 Zusätzliche Signale bei elektrischer Zugförderung: *a* Halt für Fahrzeuge mit Stromabnehmer; *b* Bügel ab. 8 H-Tafel: Halteplatz der Zugspitze bei planmäßig haltenden Zügen. 9 Haltepunkttafel — ein Haltepunkt ist zu erwarten. 10 Rangierhalttafel. 11 Schachbrettafel — Hauptsignal nicht unmittelbar rechts neben oder über dem Gleis. 12 Geschwindigkeitstafel (15 km/h). 13 Eckentafel — Geschwindigkeitsbeschränkung muß durchgeführt sein. 14 Pfeiftafel vor Gefahrenpunkt. 15 Trapeztafel — Kennzeichnung der Stelle, wo bestimmte Züge vor einer Betriebsstelle zu halten haben (Ersatz für Hauptsignal auf Nebenbahnen). 16 Kreuztafel — bei fehlendem Vorsignal wird angezeigt, daß ein Hauptsignal zu erwarten ist. 17 Überwachungssignal einer Wegübergangssicherungsanlage: a Wegübergang ist gesichert, unverminderte Geschwindigkeit für das Befahren erlaubt; *b* Wegübergang ist nicht gesichert, vorsichtig mit Schrittgeschwindigkeit befahren

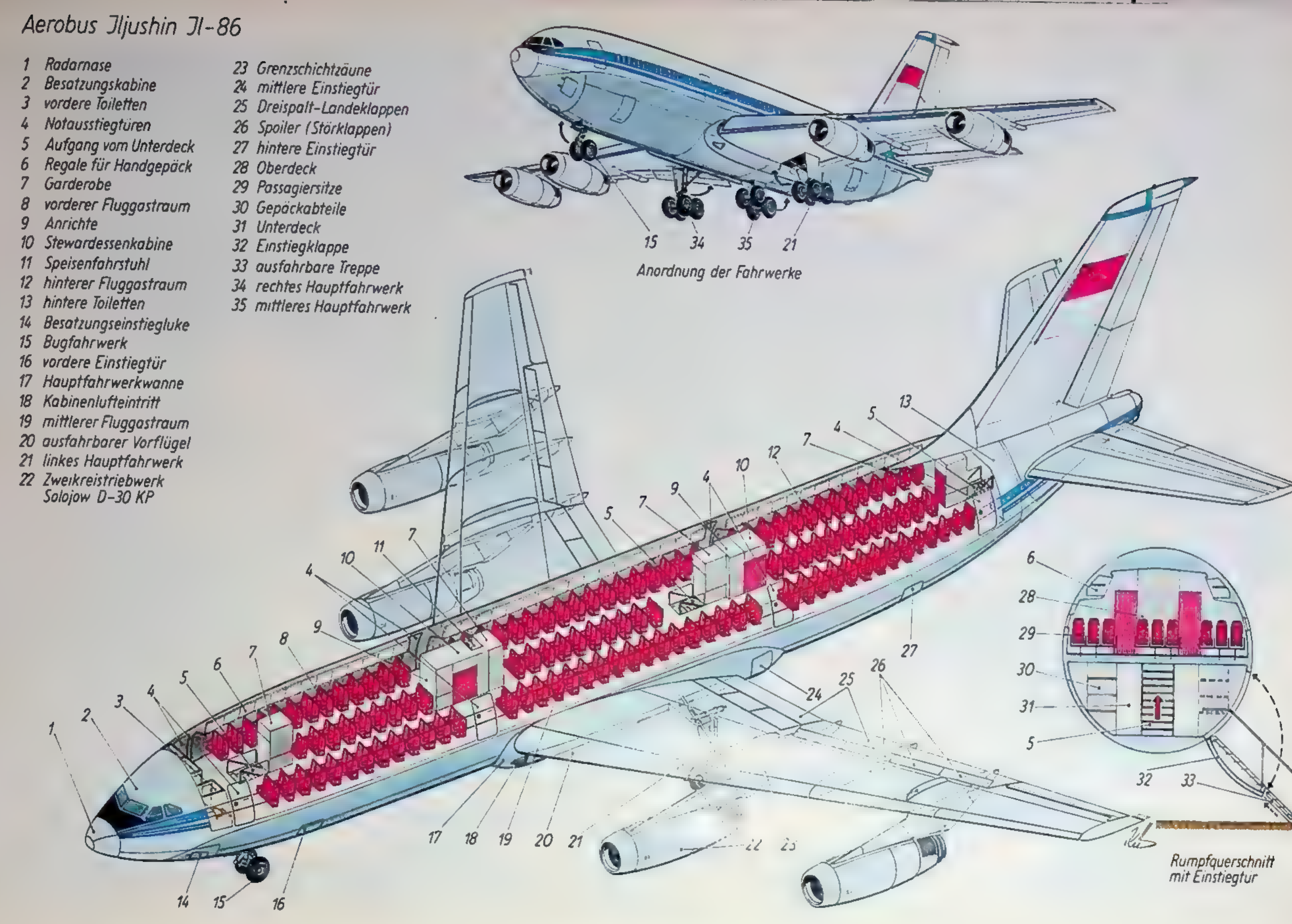


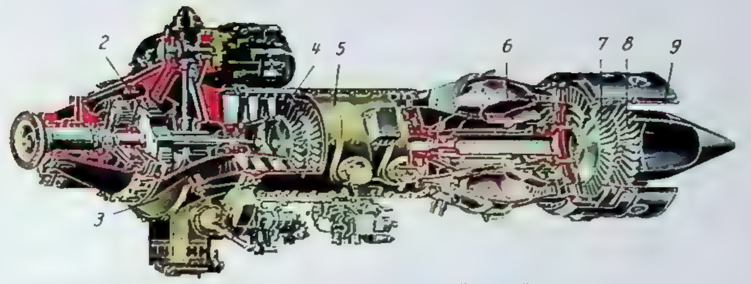
Tafel 92 Nachrichtentechnik III — Fernsehtechnik


Stückgutfrachter Typ „Poseidon-271"
5744/3453 BRT · 3010/1944 NRT · 4000 kW · 17,0 kn (15,6 kn) · $L_{ü.a.}$ 120,60 m
1 Wulstbug mit Vorsteven
2 Patentanker
3 Back
4 kombinierte Anker-Verhol-Spille
5 Einzel- und Doppelkrane 8t; a Ladepfosten, b Ladebäume
6 Luken und Laderäume; a–e für Container, Stückgut, Schwergut, Schüttgut f–g Kühlladeraum
7 Windendeck, Lüfterräume
8 Radarantennen
9 Schanzkleid
10 Kommandobrücke, Ruderhaus, Kartenraum
11 Signalmasten, Antennen
12 2 Rettungsboote unter Davits
13 Rettungsflöße (selbst aufblasbar)
14 Arbeitsboot
15 Heck (Spiegelheck)
16 Rudermaschine
17 Spatenruder
18 Verstellpropeller
19 Schiffswelle mit Wellenlagern
20 Maschinenraum; Hauptmaschine, mittelschnellaufend
21 Separatorenraum
22 Doppelboden
23 Schott
24 Bodenwrangen
25 Kettenraum
26 Vorpiek
27 Wohnräume
28 Fallreep
A Stauung
B II. Deck
C Hauptdeck
D Brückendeck
E Bootsdeck
F Kommandobrücke
G Peildeck

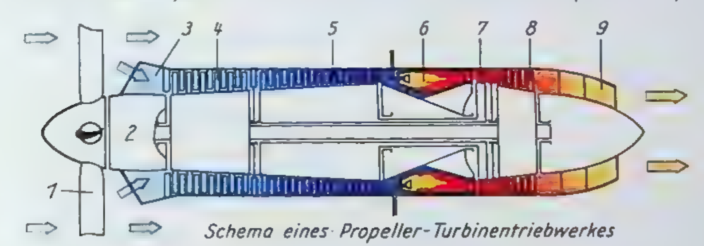
Aerobus Jljushin Jl-86

1 Radarnase
2 Besatzungskabine
3 vordere Toiletten
4 Notausstiegtüren
5 Aufgang vom Unterdeck
6 Regale für Handgepäck
7 Garderobe
8 vorderer Fluggastraum
9 Anrichte
10 Stewardessenkabine
11 Speisenfahrstuhl
12 hinterer Fluggastraum
13 hintere Toiletten
14 Besatzungseinstiegluke
15 Bugfahrwerk
16 vordere Einstiegtür
17 Hauptfahrwerkwanne
18 Kabinenlufteintritt
19 mittlerer Fluggastraum
20 ausfahrbarer Vorflügel
21 linkes Hauptfahrwerk
22 Zweikreistriebwerk Solojow D-30 KP
23 Grenzschichtzäune
24 mittlere Einstiegtür
25 Dreispalt-Landeklappen
26 Spoiler (Störklappen)
27 hintere Einstiegtür
28 Oberdeck
29 Passagiersitze
30 Gepäckabteile
31 Unterdeck
32 Einstiegklappe
33 ausfahrbare Treppe
34 rechtes Hauptfahrwerk
35 mittleres Hauptfahrwerk

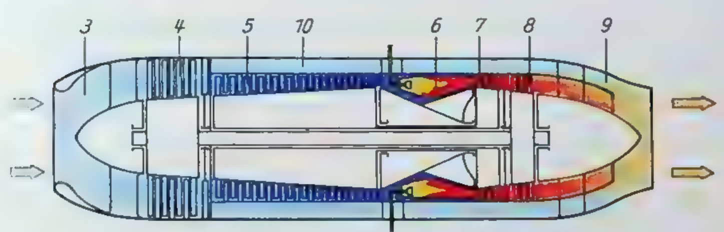




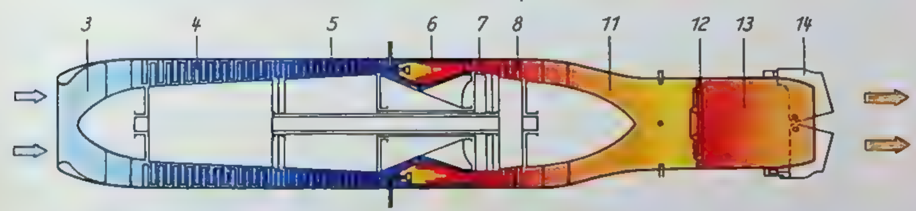
Schnittbild des Propeller-Turbinentriebwerkes "AI-24" (ohne Luftschraube)



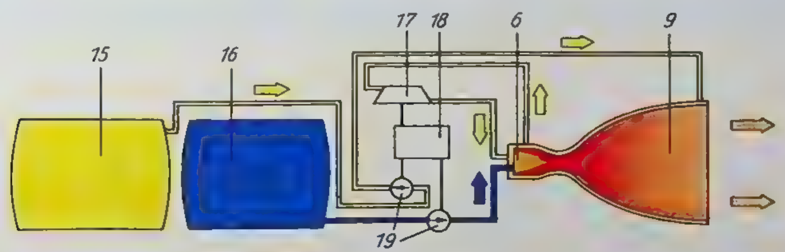
Schema eines Propeller-Turbinentriebwerkes



Schema eines Zweistrom-Turbinen-Luftstrahl-Triebwerkes (ZTL)



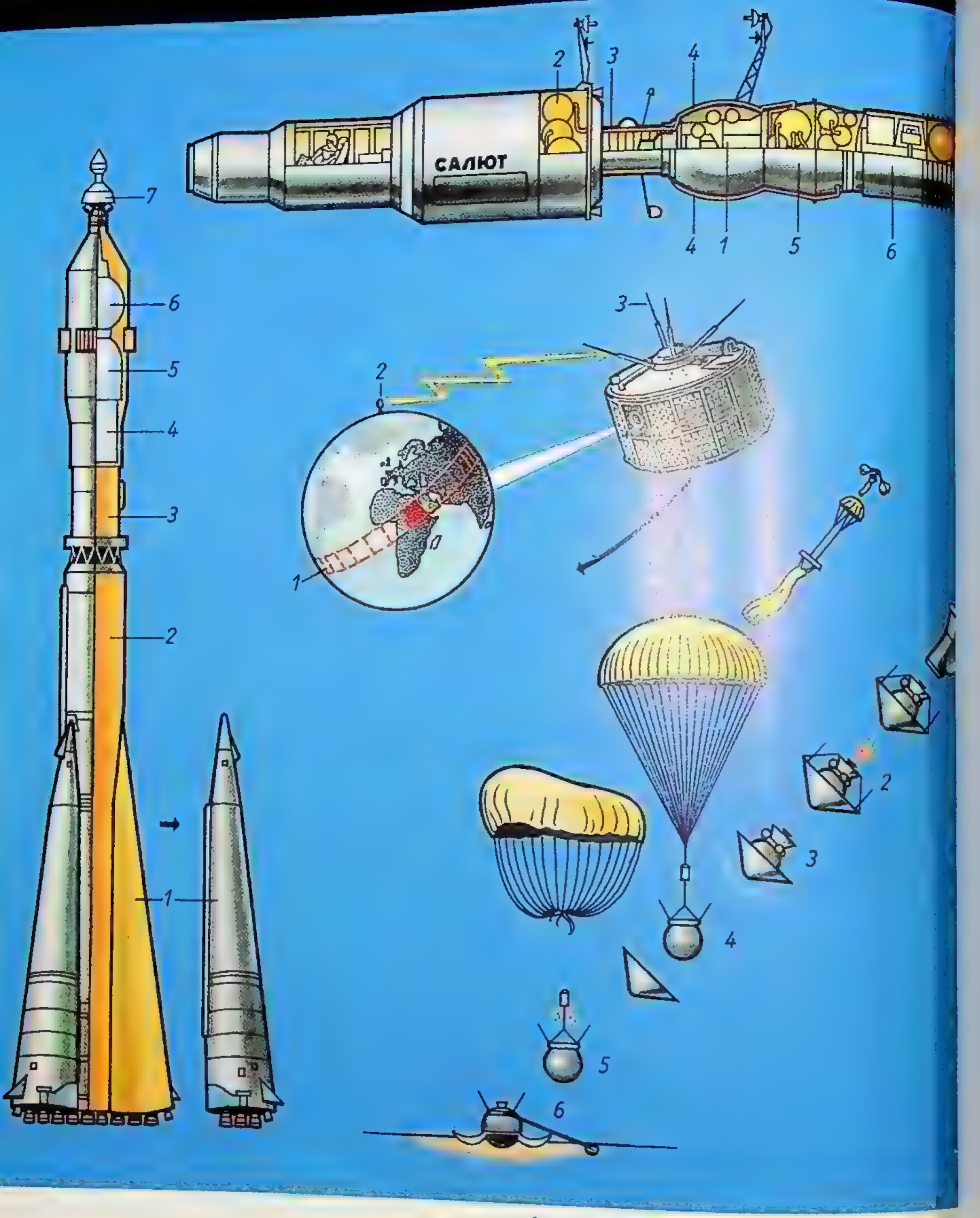
Schema eines Turbinen-Luftstrahl-Triebwerkes mit Nachverbrennung (TL)



Schema eines Flüssigkeitsraketentriebwerkes mit Pumpenförderung

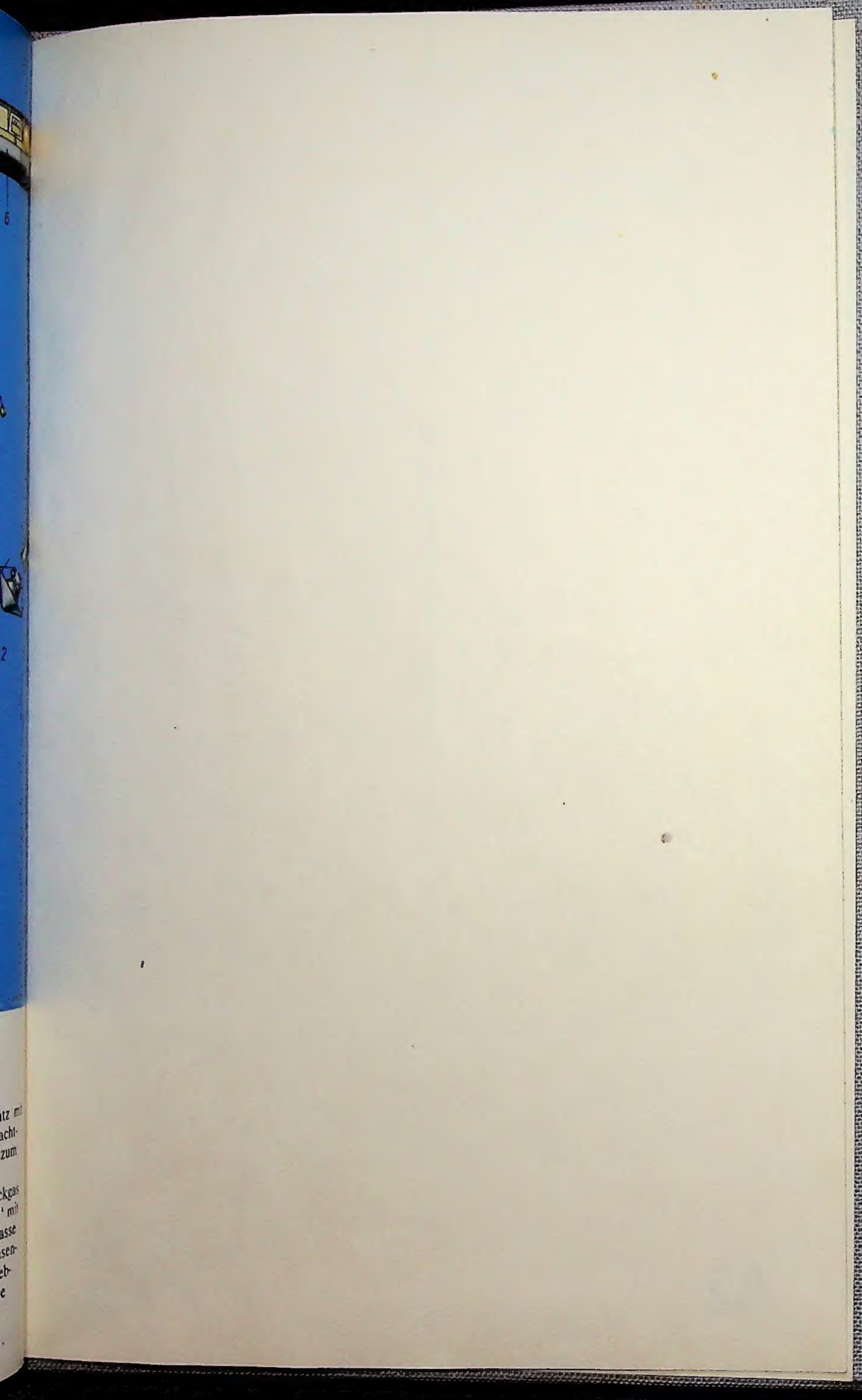
1 Luftschraube
2 Untersetzungsgetriebe
3 Einlaufkanal
4 Niederdruck-Verdichter
5 Hochdruck-Verdichter
6 Brennkammer
7 Hochdruck-Turbine
8 Niederdruck-Turbine
9 Schubdüse bzw. Ausströmdüse
10 Außenstromkanal
11 Diffusor
12 Flammenhalter
13 Nachbrennkammer
14 verstellbare Schubdüse
15 Brennstoffbehälter
16 Oxydatorbehälter
17 Dampfturbine
18 Getriebe
19 Förderpumpen

Tafel 95 Technik der Verkehrsmittel XII — Gasturbinen- und Raketentriebwerke



Tafel 96 Raumfahrttechnik III

links: „Sojus"-Trägersystem; *1* vier abwerfbare Antriebseinheiten für Startstufe, *2* Zentralantriebsteil für Start- und zweite Antriebsstufe, *3* dritte Antriebsstufe, *4* Geräte- und Versorgungsteil, *5* Kommando- und Rückkehrkapsel, *6* Orbitalsektion, *7* abtrennbarer Aufsatz mit Rettungsraketen; *oben* Versorgungsraumschiff „Progreß 1" als Tankstelle im Kosmos: *1* Frachtgüter als Nachschub für „Salut 6", *2* Tanks von „Salut 6", *3* Tankleitungen von „Salut 6" zum Kopplungsaggregat, *4* außenbords an „Progreß 1" angebrachte Nachtankleitungen, *5* Tankersektion von „Progreß 1" mit vier Kraftstoffzisternen, mehreren Kugelbehältern für Druckgas und Stickstoff sowie Pumpen u. a. Geräten, *6* Geräte- und Aggregatsektion von „Progreß 1" mit Triebwerk und automatischer Steuerungsanlage; *Mitte*: Funktion eines Wettersatelliten; *1* Trasse der Wolkenfelderaufnahmen, *2* Bodenempfangsstation, *3* Antennensystem; *unten rechts* Phasenschema zur Landetechnik auf dem Mars; *1* Abtrennen des Landeapparats, *2* Zünder der Triebwerke, *3* aerodynamisches Bremsen, *4* Sinken am Fallschirm, *5* Zünden der Bremstriebwerke und Abstoßen des Fallschirms, *6* Landeapparat in Arbeitsstellung



9.5



